N° d'ordre : 2893

THÈSE

présentée en vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ PAUL SABATIER DE TOULOUSE III

Spécialité: Télédétection Spatiale de la Biosphère

par

Valérie DEMAREZ

Modélisation du transfert radiatif et télédétection hyperspectrale pour le suivi temporel de la teneur en chlorophylle d'une Forêt Tempérée

soutenue le 16 décembre 1997

Mr. Gilbert VEDRENNE	Professeur UPS, Toulouse	Président du Jury
Mr. Bruno ANDRIEU	Chargé de Recherche CNRS, Grignon	Examinateur
Mr. François BLASCO	Directeur de Recherche CNRS, Toulouse	Examinateur
Mr. Kadi BOUATOUCH	Professeur, Université Rennes I, Rennes	Rapporteur
Mr. Donald DEERING	Resp. Dpt. Biosphère, NASA, Washington	Examinateur
Mr. J.P. GASTELLU-ETCHEGORRY	Professeur UPS, Toulouse	Directeur de thèse
Mr. Bernard SAUGIER	Professeur, Université Paris Sud, Paris	Rapporteur
Mr. Dominique VIGNES	Professeur UPS, Toulouse	Examinateur

A tous ceux qui m'ont accordé leur soutien et leur confiance

au cours de ces années riches en découvertes

Remerciements

Merci Jean-Philippe pour ta grande disponibilité, ta patience et surtout pour avoir su m'accorder ta confiance. Ta rigueur scientifique et ton soucis de la perfection m'ont énormément apporté tant sur le plan professionnel qu'humain.

Merci à mes collègues de la "Team Gastellu", avec qui j'ai eu plaisir à travailler et qui n'ont pas hésité dans les moments critiques à me donner quelques "coups de pouce".

Je tiens également à remercier les membres du Jury qui ont accepté de juger ce travail: le président du Jury, Mr Vedrenne, les rapporteurs Mr Bouatouch et Mr Saugier ainsi que les examinateurs Mr Andrieu, Mr Blasco, Mr Deering et Mr Vignes.

Merci aussi aux forces vives du laboratoire pour les fiestas inoubliables.

Merci enfin au laboratoire qui m'a accueillie, à son directeur, Mr Bauer et son équipe administrative de choc.

SOMMAIRE

SOMMAIRE

ABRÉVIATIONS ET NOTATIONS

INTRODUCTION GÉNÉRALE **1**

CHAPITRE I : Modélisation de transfert radiatif dans les couverts hétérogènes: - Le modèle DART -. **6**

I. LES DIFFÉRENTS TYPES DE MODÈLES **7**
I.1. Modèles analytiques **8**
I.2. Modèles de transfert radiatif **12**
I.2.1. Modèles pour milieux turbides **12**
I.2.2. Modèles pour milieux hétérogènes **15**

II. LE MODELE DE KIMES ET KIRCHNER **19**
II.1. Représentation du milieu **19**
II.2. Propagation de l'énergie dans la maquette **20**
II.3. Intéractions au sein des cellules "feuilles" **21**
II.4. Principales limitations du modèle de Kimes et Kirchner **22**

III. LE MODÈLE DART **22**
III.1. Type de cellules **22**
III.2. Types de paysages **28**
III.3. Transfert radiatif et approche itérative **30**
III.3.1. Transfert radiatif **30**
III.3.2. Illumination **31**
III.3.3. Propagation des rayons dans la maquette **33**
III.4. Principales particularités du modèle DART **35**
III.4.1. Rayonnements "diffus foliaire" et "non diffus foliaire" **35**
III.4.2. Diffusions au sein des cellules feuilles **36**
III.4.3. Représentation des diffusions aux itérations k>1 **40**
III.4.4. Rétrodiffusion (hot spot) **42**
III.5. Sorties du modèle DART **43**

IV FIABILITÉ ET TESTS DE VALIDITÉ DU MODÈLE DART **43**

IV.1. Validité et mode de représentation des diffusions multiples 44
IV.2. Influence de la maille d'échantillonnage de la maquette 50
IV.3. Rayonnement total et diffusé par le mésophylle foliaire 56
IV.3.1. Influence de la réflectance foliaire 57
IV.3.2. Rayonnement diffusé par le mésophylle foliaire
60
IV.4. Test de validité du modèle DART 63

V CONCLUSION PARTIELLE 67

CHAPITRE 2: ETUDE DES PARAMÈTRES BIOPHYSIQUES DE LA FORÊT DE FONTAINEBLEAU PAR TÉLÉDÉTECTION ET MODÉLISATION 71

I. INTRODUCTION 72

II. SITE D'ETUDE ET DONNEES DISPONIBLES 73
II.1. Site d'étude 73
II.2. Mesures terrains 74
II.3. Données de télédétection 76
II.4. Traitements des données spatiales 78

III. MÉTHODOLOGIE 80

IV. RESULTATS ET ANALYSE DES DONNÉES DE TÉLÉDÉTECTION 82
IV.1. Analyse des images ROSIS et SPOT 82
IV.2. Analyse statistique des spectres ROSIS *vs.* PAI et Chlorophylle 91
IV.3. PAI *vs.* Indices spectraux 96
IV.4. Chlorophylle vs. Point d'inflexion (λ_i) 101

V. CONCLUSION PARTIELLE 107

CHAPITRE 3: MODÉLISATION DE L'ÉVOLUTION DE SPECTRES DE COUVERTS EN FONCTION DE LA CHLOROPHYLLE 109

I. INTRODUCTION 110

II. ETUDE DE SENSIBILITÉ DE LA RÉFLECTANCE DU COUVERT 111

III. SIMULATION DE SPECTRES DE COUVERTS 120
III.1. Méthodologie 121
III.2. Analyse des résultats 124

V. CONCLUSION PARTIELLE 137

CONCLUSION GÉNÉRALE 138

ANNEXES

Annexe 1: Publication: "Modeling radiative transfer in heterogeneous 3-D vegetation canopies"

Annexe 2: Publication: "Modeling BRF and Radiation Regime of Tropical and Boreal Forests -PART I : BRF"

Annexe 3: Publication: " Seasonal variation of leaf chlorophyll content of a temperate forest -Inversion of the PROSPECT model"

Annexe 4: Tableaux de réflectances ROSIS et SPOT des parcelles forestières survolées

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

NOTATIONS

ABRÉVIATIONS

6s	Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum
APAR	Absorbed Photosynthetically Active Radiation.
ASE	Agence Spatiale Européenne.
CESBIO	Centre d'Études Spatiales de la BIOsphère.
DART	Discrete Anisotropic Radiative Transfer.
DBH	Diameter at Breast Heigh.
DLR	Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt
EMAC	European Multicaptor Airborne Campaign.
FRD	Facteur de Réflectance Directionnelle.
FRH	Facteur de Réflectance Hémisphérique.
HRV	Haute Résolution Visible.
KDBM	Kernel Driven Bidirectional Model.
ILWIS	The Integrated Land and Water Information System.29/09/97
K-K	Kimes and Kirchner model.
LAD	Leaf Angular Distribution.
LAI	Leaf Area Index.
LEV	Laboratoire d'Ecophysiologie Végétale (ORSAY).
NDVI	Normalised Difference Vegetation Index**.**
ONF	Office National des Forêts.
PAI	Plant Area Index.
PCA	Plant Canopy Analyser.
PIR	Domaine spectral du Proche Infrarouge
POLDER	POLarization and Directional Earth Reflectance.
PPN	Production Primaire Nette.
RMSE	Root Mean Square Error (Erreur quadratique moyenne).
ROSIS	Reflective Optics Spectrometric Imaging System.
SAIL	Scattering by Arbitrary Inclined Leaves.
SIG	Système d'Informations Géographique.
SPOT	Système Probatoire d'Observation de la Terre.
SR	Simple Ratio.
VIS	Domaine spectral du Visible
WAI	Wood Area Index.

NOTATIONS DU MODÈLE DART

L'indice "df" fait référence aux flux associés à des diffusions volumiques foliaires (mésophylle). L'indice "nf" fait référence aux flux non associés à de telles diffusions (diffusion du sol, des troncs, spéculaire des feuilles, ...). L'indice "p" fait référence aux flux polarisés d'ordre 1.
Les directions discrètes de propagation sont définies par un angle zénithal θ_n et un angle azimutal ϕ_n: $(\Omega_n) \equiv (\theta_n, \phi_n)$. La direction de la normale foliaire est notée (Ω_f).

df(Ω), nf(Ω) Fractions de rayonnement diffusé et non diffusé par le mésophylle foliaire.

f(j, $\Omega_s \rightarrow \Omega_v$, Ω_f) Fonction de diffusion totale des éléments foliaires de type j et de normale d'orientation (Ω_f) selon une direction incidente (Ω_s) et une direction de diffusion (Ω_v).

$\frac{g_f(j, \Omega_f)}{2\pi}$ Fonction de distribution normalisée des normales des feuilles de type j.

H Hauteur de la "maquette + couche fictive" (m)

i, I Indice de cellule et nombre total de cellules élémentaires.

j, J Indice et nombre total de types de cellule (Vide = 0, Sol = 1, Sous-bois = 2, Tronc = 3, Éléments foliaires de la canopée = 4 ; Eau = 5, etc.).

k Ordre d'itération du modèle DART (k = 0: .diffusion du flux solaire direct, etc.).

n, N Indice et nombre total de directions discrètes de propagation: $(\Omega_n, \Delta\Omega_n)$, $n \in [1, N]$.

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.

$u_f(i)$ Densité foliaire de la cellule "feuille" d'indice i

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

$(x_{m,k,i}, y_{m,k,i}, z_{m,k,i})$ Coordonnées du barycentre.

$E_s(\Omega_s)$ Constante solaire au niveau de la maquette.

$G(j, \Omega_n)$ Facteur géométrique: proportion de surface foliaire de type j perpendiculaire à la direction (Ω_n).

LAD Distribution angulaire foliaire.

LAI Indice foliaire.

M_s "Point milieu", *i.e.* point origine du flux d'ordre 1 diffusé par une cellule "feuille".

$R(\Omega_v)$, $R_{df}(\Omega_v)$, $R_{nf}(\Omega_v)$ Facteur de réflectance totale, "df" et "nf" selon Ω_v.

SKYL Rapport des éclairements atmosphérique et totaux incidents sur la maquette.

$T(j,\Omega_s,\Omega_v)$, $T_{df}(j,\Omega_s,\Omega_v)$, $T_{nf}(j,\Omega_s,\Omega_v)$ Fonctions de diffusion totale, "df" et "nf" d'une cellule de type j.

$T(\Delta l_i, \Omega_n)$ Transmittance selon Ω_n d'une cellule i pour un trajet Δl_i.

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

$\langle T_i \rangle$ Transmittance moyenne à partir du centre d'une cellule i (*cf.* diffusions multiples).

$\langle T(j,\Omega_s,\Omega_v) \rangle_{\Omega_s}$ Fonction de phase moyenne de la cellule de type j selon Ω_v.

$W_{diff}(i,\Omega_v)$ Flux diffusé dans la direction (Ω_v) par une cellule de type i.

$W_{in}(0,\Omega_n)$ Flux incident selon Ω_n.

$W_{int}(\Delta l_i,\Omega_n)$ Flux intercepté selon Ω_n par une cellule i le long du trajet Δl_i

$W_{trans}(\Delta l_i,\Omega_n)$ Flux transmis selon Ω_n par une cellule "feuille" i après un trajet Δl_i.

$W_{trans}(\Omega_n)$ Flux transmis selon Ω_n par une cellule de type "tronc".

$W_s(z=H,\Omega_s)$, $W_a(z=H,\Omega_n)$ Flux solaire et atmosphérique incidents sur la maquette.

$W_{out}(z=H,\Omega_v)$ Flux sortant de la maquette selon Ω_v.

$W(\Omega_n)$, $W_{df}(\Omega_n)$, $W_{nf}(\Omega_n)$, $W_p(\Omega_n)$ Flux total, "df", "nf" et "p" sortant de la cellule selon Ω_n.

$\mathbb{W}_1(\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v)$ Diffusion d'ordre 1 totale, "df" et "nf" dans la cellule depuis M_s.

$\mathbb{W}_{1,int}(\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v)$ Flux $\mathbb{W}_1(\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v)$ intercepté lors de la sortie d'une cellule i.

$W_1(\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v)$ Diffusions d'ordre 1 sortant de la cellule i.

$W_M(\Delta l_i,\Omega_s)$ Diffusions multiples sortant d'une cellule i.

$\alpha(r,\Omega)$ Coefficient d'extinction dans la direction (Ω).

$\alpha(\Omega_s,\Omega_v,\delta s_i)$ Coefficient d'extinction avec prise en compte de l'effet 'hot spot', à une distance δs_i du point milieu.

$\alpha_d(r,\Omega' \rightarrow \Omega)$ Section efficace de diffusion différentielle au point r, pour un angle solide unité et selon (Ω).

η Coefficient d'interception des cellules "tronc".

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

ρ_{sol}, ρ_{tronc} Réflectances hémisphériques des cellules de type "sol" et "tronc".

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

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

$\Delta l_i(\Omega_n)$ Longueur de traversée d'un rayon à travers une cellule i selon la direction (Ω_n).

$\Delta r_i(\Omega_n)$ Distance entre le point d'entrée dans la cellule i et M_s selon la direction (Ω_n).

$\Delta s_i(\Omega_n)$ Distance entre M_s et le point de sortie dans la cellule i selon la direction (Ω_n).

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

$\Delta\Omega_n$, $\Delta\theta_n$, $\Delta\phi_n$ Angle solide (sr), largeur zénithale (°) et largeur azimutale (°) de (Ω_n).

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La télédétection spatiale, compte tenu de sa capacité à fournir des informations synoptiques à différentes échelles de temps et d'espace, est devenue un outil indispensable pour l'étude des écosystèmes terrestres et des flux gazeux et hydriques à l'interface "Biosphère Continentale - Atmosphère". Ainsi, elle permet de fournir des paramètres d'entrée aux modèles de fonctionnement de la végétation. Dans de nombreux cas, elle constitue l'unique source possible d'information. Parmi les paramètres et quantités susceptibles d'être déterminés à partir de mesures acquises depuis l'espace, il convient de mentionner en particulier l'indice foliaire (LAI), *i.e.* la surface foliaire par surface unité de sol, le taux de couverture (%C), et la concentration biochimique foliaire en éléments tels que la chlorophylle et la cellulose. La chlorophylle est un paramètre particulièrement important compte tenu de son rôle majeur au niveau de la production primaire nette (PPN) de la Biosphère Continentale et par suite pour ce qui est des flux de dioxyde de carbone à l'interface "végétation - atmosphère".

Les relations utilisées pour relier les données de télédétection aux quantités biophysiques et biochimiques caractéristiques de la végétation et de son fonctionnement sont généralement établies de manière empirique. Par exemple, de manière statistique à partir de mesures satellitales et de mesures in-situ ou bien de manière semi-empirique à l'aide de modèles de réflectance relativement simples (Sellers *et al.*, 1992). Lors d'études dites globales, ces relations sont souvent supposées être plus ou moins robustes dans le temps et l'espace, du moins au cours d'une saison et à l'intérieur des grands biomes terrestres généralement considérés (Field, *et al.*, 1995 ; Sellers *et al.*, 1996). L'importante variabilité des conditions expérimentales d'acquisition des mesures satellitales combinée à la diversité des milieux étudiés explique la difficulté, sinon l'impossibilité, d'obtenir des relations générales indépendantes du milieu et de son état physiologique et des configurations d'acquisition. Ainsi, un couvert forestier et une savane herbeuse ayant le même LAI donnent généralement lieu à des reflectances différentes et donc à des mesures satellitales différentes. Il n'existe donc pas de relation "LAI - réflectance" unique indépendante du milieu. Ceci est en général également vrai pour les autres paramètres biophysiques et biochimiques de la végétation. Cette absence de relations robustes est évidemment une contrainte sérieuse pour l'étude de la végétation par télédétection spatiale. Il est souvent escompté que l'amélioration de l'échantillonnage spectral et directionnel (*e.g.*, POLDER, MISR, MODIS) permette de relier de manière unique certains paramètres de la végétation aux mesures satellitales. Ce lien est susceptible d'être représenté par de simples

relations analytiques déterminées empiriquement ou bien de manière théorique avec des modèles de réflectance des surfaces terrestres.

Le nombre élevé de modèles de réflectance à la fois anciens et récents illustre le fait que notre communauté scientifique n'a pas encore développé un "modèle universel" capable de relier de manière fiable les mesures satellitales aux paramètres biophysiques et biochimiques de la végétation. La principale explication est que la végétation terrestre est constituée par une distribution volumique (3-D) de matière, *i.e.* éléments diffusants et absorbants, extrêmement complexe. En effet, cette distribution peut rarement être assimilée au cas simple d'un milieu aléatoire ou constant dans l'espace. Ainsi, généralement elle varie localement et/ou présente des corrélations spatiales. Dans les travaux présentés par la suite, les milieux caractérisés par une telle distribution sont dits "hétérogènes". Ceci est le cas de la plupart des milieux naturels, et en particulier des milieux arborés : le regroupement des éléments foliaires en tant que houppiers et en tant qu'amas (notés "clumps" dans la terminologie anglaise) au sein des houppiers correspond à une distribution 3-D hétérogène. Contrairement aux milieux homogènes, les propriétés optiques (*i.e.* réflectance et transmittance) des milieux hétérogènes dépendent donc de la distribution spatiale des éléments qui les composent. Ainsi, une loi physique telle que la transmittance moyenne, généralement acceptée pour des milieux homogènes comme l'atmosphère et les couverts agricoles dans une moindre mesure, devient invalide pour des milieux caractérisés par une distribution 3-D non homogène de leurs éléments diffusants et absorbants (Guillevic et Gastellu-Etchegorry, 1997). La complexité du régime radiatif de milieux hétérogènes tels que les couverts arborés a d'importantes conséquences sur la mesure de télédétection. Ainsi, la variabilité de la réflectance entre pixels est très dépendante du rapport des dimensions du pixel et des hétérogénéités du milieu. Cette complexité explique aussi que la réflectance d'un pixel, *i.e.* la combinaison non linéaire de la réflectance et transmittance d'éléments à l'ombre et directement éclairés par le soleil, ne peut donc être simulée avec un modèle qui néglige l'architecture du milieu.

Les remarques précédentes illustrent quelques aspects de la complexité du régime radiatif des couverts arborés, et par suite expliquent la difficulté d'établir de manière empirique et simple des relations générales entre paramètres biophysiques et mesures satellitales. Dans ce contexte, les modèles de réflectance sont des outils d'analyse extrêmement utiles, sous réserve d'être bien adaptés aux milieux observés et au problème posé. Ainsi, ils doivent être précis et faire

intervenir, directement ou indirectement, les paramètres biophysiques et biochimiques qui influencent la réflectance des couverts. Les modèles permettent alors d'évaluer la robustesse des relations considérées selon le milieu et les conditions d'acquisition de l'image satellitale. En fait, l'absence de modèles de réflectance réellement adaptés à des milieux hétérogènes tels que les forêts limite beaucoup l'étude de ces milieux par télédétection.

J'ai consacré la première moitié de ma thèse au développement d'un modèle original de transfert radiatif adapté à ces milieux : le modèle DART (Discrete Anisotropic Radiative Transfer). L'objectif a été de développer un outil précis et cependant relativement simple d'utilisation. Les principales bases théoriques du modèle DART sont résumées dans le premier chapitre de ce recueil, après une brève revue bibliographique des principaux types de modèles. Pour de plus amples détails sur le modèle DART il convient de se référer à la publication (Gastellu-Etchegorry *et al.*, 1996) jointe en annexe.

L'emploi de tout modèle implique de connaître ses contraintes d'utilisation et sa fiabilité. La deuxième partie du premier chapitre est consacrée à ces deux aspects. Je présente les résultats que j'ai obtenu sur la sensibilité de la réflectance des couverts au mode de représentation de phénomènes physiques dans le modèle DART : diffusions multiples, maille d'échantillonnage du milieu, et distinction du rayonnement total et du rayonnement issu du mésophylle foliaire. De plus, je résume une étude de validation du modèle DART, à laquelle j'ai participé. La publication correspondante (Gastellu-Etchegorry *et al.*, 1997) est jointe en annexe. Ce travail a été conduit sur des sites de forêt boréale. L'intérêt majeur de ce travail est d'avoir été réalisés avec des jeux de données très précis et rarement disponibles.

La deuxième moitié de ma thèse m'a permis d'appliquer le modèle DART dans le cadre d'une étude de la variation saisonnière de l'activité photosynthétique d'une forêt tempérée (forêt de Fontainebleau). Ma contribution a consisté à évaluer le potentiel de mesures spectrométriques de terrain et de télédétection acquises dans le visible et le proche infrarouge pour déterminer l'évolution saisonnière du LAI et de la concentration foliaire en chlorophylle de la forêt. Il a donné lieu à des travaux à la fois empiriques et théoriques.

L'étude empirique a été réalisée dans le cadre d'un projet de l'Agence Spatiale Européenne (ASE), démarré en 1994. Elle est résumée dans le deuxième chapitre, avec la présentation du

site d'étude, des mesures de terrain (LAI, chlorophylle), des mesures spectrométriques foliaires de laboratoire et des données du spectromètre aéroporté ROSIS acquises en 1994. Depuis lors, les travaux de terrain ont été poursuivis. Ainsi, en 1996 j'ai mesuré avec un spectromètre de laboratoire l'évolution sur toute une saison des propriétés optiques foliaires de chênes, hêtres et charmes. Mon objectif était d'étudier le comportement saisonnier de la concentration foliaire en chlorophylle en liaison avec les propriétés optiques foliaires. J'ai réalisé ce travail avec l'inversion du modèle de réflectance et transmittance foliaire PROSPECT (Jacquemoud, 1992) à partir des mesures spectrométriques (Demarez *et al.*, 1997 ; publication jointe en annexe). L'exploitation de ces données a permis l'obtention de relations empiriques entre les mesures spectrométriques d'une part et le LAI et la concentration foliaire en chlorophylle d'autre part. Une étude comparative a aussi été réalisée avec une image SPOT acquise à la même date que les données ROSIS.

La difficulté d'obtenir des résultats statistiquement fiables avec l'approche empirique, en particulier pour ce qui est des relations "chlorophylle foliaire-mesures de télédétection", m'a conduit à compléter ce travail par une approche plus théorique basée sur l'utilisation du modèle DART. Ce travail est présenté dans le troisième chapitre. Le lien entre les mesures spectrométriques aéroportées du couvert forestier et les concentrations foliaires en chlorophylle a été réalisé en couplant le modèle DART avec le modèle PROSPECT. Après une discussion sur la sensibilité de la réflectance du couvert forestier à différents paramètres (direction d'illumination solaire, direction d'observation, albédo foliaire, LAI), en haut et en bas de l'atmosphère, une méthode développée pour déterminer la concentration foliaire en chlorophylle est discutée. Elle repose sur la détermination de la concentration en chlorophylle foliaire à partir de la position du point d'inflexion (λ_i) de la réflectance dans le domaine spectral dit du "red edge", entre le rouge et le proche infrarouge. La robustesse de cette approche a été étudiée pour différents facteurs biophysiques (*i.e.*, LAI, direction de visée).

CHAPITRE I

MODELISATION DU TRANSFERT RADIATIF DANS LES COUVERTS HETEROGENES

- LE MODELE DART -

I. LES DIFFÉRENTS TYPES DE MODÈLE

La réflectance directionnelle des couverts est en général représentée par le facteur de réflectance directionnelle (FRD). Ce terme $R(\Omega_s,\Omega_v)$ est égal au rapport de la luminance $L(\Omega_v)$ réfléchie selon la direction (Ω_v) par un couvert soumis à un éclairement mono-directionnel selon la direction (Ω_s) par la luminance $L_{ref}(\Omega_v)$ réfléchie selon la direction (Ω_v) par une surface blanche lambertienne soumise aux mêmes conditions d'éclairement et de visée que le couvert. De manière à rendre compte de situations réelles, c'est à dire si l'éclairement incident n'est pas uniquement directionnel mais distribué sur un hémisphère comme dans le cas de l'éclairement solaire et atmosphérique, il est aussi souvent utilisé la facteur de réflectance hémisphérique (FRH).

La réflectance directionnelle des couverts dépend de nombreux paramètres. Ce sont principalement les paramètres expérimentaux (direction de visée et conditions d'éclairement), les paramètres environnementaux associés à l'architecture (*e.g.*, LAI, %C, distribution angulaire foliaire (LAD), hauteur des arbres, dimensions des houppiers) du couvert et les propriétés optiques (*e.g.*, réflectance et transmittance spectrales) des éléments constitutifs du milieu. Par exemple, le LAD est plutôt planophile pour une hêtraie et plutôt sphérique pour une chênaie. Seule la réflectance et la transmittance foliaires dépendent directement de la concentration en chlorophylle. Ainsi, la forte augmentation de la réflectance foliaire du rouge (≈3-10%) au proche infrarouge (≈40-60%) est essentiellement due à la forte diminution de l'absorption spectrale de la chlorophylle, lorsqu'on passe du rouge au proche infrarouge.

Différents types de modèles sont généralement utilisés pour étudier la réflectance et le bilan radiatif des couverts. En fait, les modèles existants sont plus ou moins exacts selon les caractéristiques du milieu étudié. Les principes de quelques types majeurs de modèles sont brièvement résumés ci-dessous. Il est en particulier distingué deux groupes de modèles. Le premier groupe comprend les modèles qui expriment la réflectance du milieu à l'aide d'une simple expression analytique. Ce sont les modèles empiriques et semi-empiriques, *i.e.* déduits de la simplification de modèles plus complexes. Le deuxième groupe comprend les modèles qui simulent la réflectance directement à partir de la modélisation du transfert radiatif à l'intérieur du couvert.

I.1 Modèles analytiques

Ces modèles représentent la réflectance du couvert $R(\Omega_s,\Omega_v)$ par des expressions analytiques qui dépendent des directions d'éclairement (Ω_s) et d'observation (Ω_v). Ces expressions proviennent d'approches essentiellement empiriques et/ou de la simplification de modèles de transfert radiatif. Leur utilisation est généralement réservée à la normalisation des mesures satellitales disponibles et au calcul de l'albédo à partir de ces mesures. Le schéma classique d'utilisation est très simple. Il comprend habituellement une étape préliminaire dédiée au calcul de paramètres de calage qui assurent la meilleure régression des mesures disponibles. Le nombre de paramètres de calage utilisés diffère selon les modèles. Bien évidemment, il doit être peu élevé en présence d'un faible nombre de mesures directionnelles indépendantes, et peut par contre être plus élevé dans le cas contraire. Quelques modèles majeurs sont indiqués ci-dessous :

- $R(\theta_s,\theta_v) = R(0,0).\frac{k+1}{2}.\cos^{k-1}(\theta_s).\cos^{k-1}(\theta_v).$ (Minnaert, 1941)

  Ce modèle empirique est dit à 2 paramètres (R(0,0) et k). La réflectance est lambertienne si k=1. Elle est maximale au nadir si k>1, et minimale si k<1. θ_s et θ_v sont respectivement les angles zénithaux des directions (Ω_s) et (Ω_v).

- $R(\Omega_s,\Omega_v) = a.\theta_v^2 + b.\theta_v.\cos(\phi_{vs}) + c$ où $\phi_{vs}=\phi_v-\phi_s$ (Walthall *et al.*, 1985)

  Modification par Nilson et Kuusk (1989) : $R(\Omega_s,\Omega_v) = a.(\theta_v^2+\theta_s^2) + b.\theta_s^2.\theta_v^2 + c.\theta_s.\theta_v.\cos(\phi_{vs}) + d$

- $R(\Omega_s,\Omega_v) = \rho_{moy}.\frac{[\cos\theta_s.\cos\theta_v]^{k-1}}{[\cos\theta_s+\cos\theta_v]^{1-k}}.\Gamma(\theta_s,\theta_v,\phi_{vs}).[1+\frac{1-\rho_{moy}}{1+G}]$ (Rahman *et al.*, 1992)

  $G=\sqrt{\tan^2\theta_s+\tan^2\theta_v-2\tan\theta_s.\tan^2\theta_s.\cos\phi_{vs}}$ et $\Gamma(\theta_s,\theta_v,\phi_{vs})=\frac{1-g^2}{1+g^2+2g.\cos\Psi_{sv}}$ est la fonction de phase de Henyey-Greenstein (g est le facteur d'asymétrie).

  Ce modèle non linéaire résulte de l'ajout de termes "physiques" au modèle de Minnaert (1941).

- $R(\Omega_s,\Omega_v) = \frac{\omega}{4}.\frac{1}{\mu_s+\mu_v}.[P(\Omega_s,\Omega_v).(1+b(\Omega_s,\Omega_v)) + H(\omega_v,\mu_s).H(\omega,\mu_v) - 1]$ (Hapke, 1986)

$$b(\Psi_{sv}) \approx b_o.[1+\frac{1}{h}.\tan(\frac{\Psi_{sv}}{2})]^{-1} \quad H(\omega,x) = \frac{1+2.x}{1+2.x.\sqrt{1-\omega}}$$

pour un milieu constitué de particules d'albédo ω et de fonction de phase $P(\Omega_s,\Omega_v)$.

- $R(\Omega_s,\Omega_v) = k_o + k_1.\frac{(\pi-\phi_{vs}).\cos\phi_{vs}+\sin\phi_{vs}}{4.(\cot\theta_s+\cot\theta_v)} + k_2.\frac{\sin\phi_{vs}-\phi_{vs}.\cos\phi_{vs}}{4.(\cot\theta_s+\cot\theta_v)}$ (Deering *et al.*, 1990)

  Ce modèle dérive de considérations géométriques pour un milieu constitué d'un sol lambertien (réflectance ρ_{sol}) surplombé de protusions opaques (réflectance ρ_p et projection verticale par unité de surface s) et de facettes (réflectance ρ_f et transmittance τ_f). La proportion de sol labertien est f.

  $k_o = f.\rho_{sol}.e^{-s.(\tan\theta_s+\tan\theta_v)}$ $k_1 = [(1-f).\rho_f - \rho_p].e^{-s.(\tan\theta_s+\tan\theta_v)} + \rho_p$ $k_2 = (1-f).\tau_f.e^{-s.(\tan\theta_s+\tan\theta_v)}$

- $R(\Omega_s,\Omega_v) = k_o + k_1.f_1(\theta_s,\theta_v,\phi_{vs}) + k_2.f_2(\theta_s,\theta_v,\phi_{vs})$

  La réflectance est alors représentée en tant que combinaison linéaire de termes f_1 et f_2 supposés représenter les formes les plus classiques des FRD et FRH. En pratique, les termes f_1 et f_2 sont respectivement associés aux diffusions de surface et de volume. La réflectance d'un pixel comprenant un couvert arboré et une prairie peut ainsi être évaluée comme étant la somme des composantes associées aux diffusions de volume (f_2) et de surface (f_1) du couvert arboré et de la prairie pondérées par leurs surfaces respectives. L'emploi d'une combinaison linéaire de fonctions facilite beaucoup les calculs à différents niveaux. Ainsi, il est possible d'utiliser des procédures d'inversion très simples, basées par exemple sur la nullité des dérivées partielles d'une fonction d'erreur $\varepsilon(R(\Omega_s,\Omega_v))$ selon k_o, k_1 et k_2, pour obtenir ces coefficients à partir de mesures expérimentales. D'autre part, le calcul de l'albédo peut se ramèner à une combinaison linéaire de termes pré-calculés. Ces modèles, appelés "KDBM" (Kernel Driven Bidirectional Model) dans la terminologie anglaise, ne sont cependant pas toujours optimaux pour simuler les mesures satellitales. Les expressions les plus courantes de f_1 et f_2 (Roujean *et al.*, 1992 ; Wanner *et al.*, 1995) sont indiquées ci-dessous. Dans les deux cas, fonctions f_1 et f_2 sont nulles si $\theta_s=\theta_v=0°$ Le terme k_o est donc une réflectance normalisée des effets bidirectionnels de surface, *i.e.* réflectance qui serait observée au nadir pour un soleil au zénith. Il tend à représenter la composante de la réflectance due aux diffusions multiples du couvert car cette composante est relativement isotrope (Roujean, 1991).

  Dans le modèle de Roujean *et al.* (1992), les fonctions f_1 et f_2 sont décorrélées ($r\approx-0.28$). Le terme surfacique f_1 dérive d'un modèle géométrique simple où le milieu est assimilé à une distribution aléatoire de réflecteurs parallélépipédiques opaques de hauteur h et de longueur l disposés sur une surface plane. Les interactions entre réflecteurs sont négligées.

$$f_1 = \frac{1}{2\pi}.[(\pi-\phi_{vs}).\cos\phi_{vs} + \sin\phi_{vs}].\tan\theta_s.\tan\theta_v - \frac{1}{\pi}.(\tan\theta_s + \tan\theta_v) + \sqrt{\tan^2\theta_s + \tan^2\theta_v - 2.\tan\theta_s.\tan\theta_v.\cos\phi_{vs}}$$

avec $R(\Omega_s,\Omega_v) = \rho_{sol}.[1 + \frac{h.l}{S}.f_1]$ S est la surface de sol par protusion.

Le terme volumique f_2 dérive de la simplification du modèle turbide de Ross (1981) :

$$R(\Omega_s,\Omega_v) = \frac{\Gamma(\Omega_s,\Omega_v)}{G(\theta_s).\mu_s + G(\theta_v).\mu_v}.[1-\exp[-LAI.(\frac{G(\theta_s)}{\mu_s}+\frac{G(\theta_v)}{\mu_v})] + \rho_{sol}.\exp[-LAI.(\frac{G(\theta_s)}{\mu_s}+\frac{G(\theta_v)}{\mu_v})] \quad \mu=\cos\theta$$

Ce modèle simule les diffusions d'ordre 1 d'un milieu homogène de diffuseurs caractérisés par des facteurs géométriques $G(\theta_s)$ et $G(\theta_v)$ où la fonction de phase volumique est $\frac{\Gamma(\Omega_s,\Omega_v)}{4\pi}$.

Avec l'hypothèse d'un LAD sphérique, Roujean (1991) détermine :

$$f_2 = \frac{4}{3\pi}.[\frac{(\frac{\pi}{2} - \Psi_{sv}).\cos\Psi_{sv} + \sin\Psi_{sv}}{\cos\theta_s + \cos\theta_v}] - \frac{1}{3} \qquad \text{avec } R(\Omega_s,\Omega_v) = \frac{\omega_f}{2}.f_2.(1-e^{-2.LAI})+\rho_{sol}.e^{-2LAI}$$

Wanner *et al.* (1995) ont déterminé le terme f_1 par simplification du modèle géométrique de Li et Strahler (1986). Ils ont obtenu deux expressions analytiques selon que le taux de couverture arborée est faible ou élevé, c'est à dire selon que les arbres peuvent se faire ou non de l'ombre. En fait, un plus grand nombre d'expressions si l'on considère différentes dimensions pour les arbres. D'autre part, Wanner *et al.* (1995) ont simplifié le modèle turbide de Ross (1981) pour calculer le terme f_2 dans le cas où le LAI est faible et où le LAI est élevé.

LAI faible : $$f_2(\theta_s,\theta_v,\phi_{vs}) = \frac{(\frac{\pi}{2} - \Psi_{sv}).\cos\Psi_{sv} + \sin\Psi_{sv}}{\cos\theta_s \,.\, \cos\theta_v} - \frac{\pi}{2}$$ Ψ_{sv} est l'angle de phase.

LAI élevé : $$f_2(\theta_s,\theta_v,\phi_{vs}) = \frac{(\frac{\pi}{2} - \Psi_{sv}).\cos\Psi_{sv} + \sin\Psi_{sv}}{\cos\theta_s + \cos\theta_v} - \frac{\pi}{4}$$

- $R(\Omega_s,\Omega_v) = f(\Omega_s,\Omega_v) \,.\, f'(\Omega_s,\Omega_v)$ (Estève, 1997)

$f(\Omega_s,\Omega_v) = c_1.\theta_v^2.\cos^2(\phi_{sv}) + c_2.\theta_v^2.\sin^2(\phi_{sv}) + c_3.\theta_v.\cos(\phi_{sv}) + c_4$ $\phi_{sv}=\phi_v-\phi_s$

$f'(\Omega_s,\Omega_v) = 1 + c_5.\exp[-a_1.(\frac{\Psi_{sv}}{c_6})^2]$ où $\Psi_{sv}=A\cos(\Omega_s.\Omega_v)$

Le terme $f(\Omega_s,\Omega_v)$ représente la composante "bol" de la réflectance alors que le terme $f'(\Omega_s,\Omega_v)$ représente la composante "rétrodiffusion", communément appelé "hot spot". Ainsi,

les coefficients c_5 et c_6 indiquent respectivement l'intensité et la largeur du phénomène de rétrodiffusion. Ce modèle suppose l'existence d'une symétrie azimutale de la réflectance par rapport au plan d'incidence solaire, souvent appelé plan principal solaire. En effet, les angles azimutaux ϕ_v et ϕ_s n'interviennent que par l'intermédiaire de fonctions paires selon la différence $\phi_{sv}=\phi_v-\phi_s$. Les termes angulaires au carré, *i.e.* θ_v^2, permettent de rendre compte de la forme de bol généralement due aux diffusions dites de volume dans les milieux naturels, de la même manière que le terme f_2 des modèles linéaires de Wanner *et al.* (1995). Le terme c_4 indique la réflectance au nadir en l'absence de phénomène de rétrodiffusion. Contrairement aux modèles KDBM, ce modèle a été conçu en vue d'optimiser la régression de mesures satellitales, tout en permettant une inversion à la fois fiable, simple et rapide (Estève, 1997) pour obtenir les coefficients de calage optimaux c_i. L'inversion est réalisée directement sur les paramètres biophysiques du couvert avec la méthode du simplexe. Elle est réalisée à l'aide d'interpolations sur une table pré-calculée qui contient un grand nombre d'ensembles de valeurs discrètes de paramètres biophysiques et de coefficients c_i correspondants. Cette table peut être établie avec tout modèle de transfert radiatif qui utilise comme paramètres d'entrée les paramètres biophysiques recherchés. Un ensemble de mesures peut aussi être utilisé.

D'une manière générale, les coefficients des modèles analytiques sont calculés par régression à partir de mesures satellitales ou bien à partir de modèles de réflectance supposés exacts, si l'objectif est d'améliorer ou de tester la validité de ces modèles analytiques. De par leur rapidité d'inversion les modèles analytiques linéaires sont très efficaces pour réaliser en temps réel la normalisation des mesures satellitales et le calcul d'une quantité biophysique telle que l'albédo. Par contre, l'obtention de paramètres biophysiques (LAI, %C, etc.) est généralement impossible. L'approche tabulée utilisée par Estève (1997) permet d'obtenir ces paramètres. La vitesse d'exécution de l'inversion est cependant moins rapide que pour les modèles linéaires, mais est beaucoup plus rapide que pour les modèles de transfert radiatif introduits dans le paragraphe suivant.

I.2 Modèles de transfert radiatif

Contrairement aux modèles analytiques précédents, ces modèles calculent la réflectance des couverts à partir de la simulation de la propagation du rayonnement à l'intérieur du couvert, c'est à dire avec la simulation du transfert radiatif. Ils sont donc généralement plus exacts et plus robustes aux conditions expérimentales d'acquisition et aux caractéristiques du milieu étudié. La plupart des modèles de transfert radiatif reposent sur l'optique géométrique, le calcul de la transmittance moyenne et/ou l'équation du transfert radiatif. Ils se distinguent par la manière dont le milieu de propagation est pris en compte et par l'approche mathématique (méthode intégrale, etc.) utilisée pour simuler le transfert radiatif. Ainsi, l'approche mathématique employée peut être analytique, intégro-différentielle ou numérique. Cette approche dépend de la façon dont le milieu étudié est simulé. Ainsi, un milieu peut être représenté par la superposition de couches horizontales comprenant des distributions spatiales uniformes d'éléments diffusants et absorbants. Le milieu est alors dit turbide mono ou multi-couches. Il est souvent employé des méthodes analytiques et intégro-différentielles. Inversement, le milieu de propagation peut être simulé par une distribution spatiale non uniforme d'éléments diffusants et absorbants. Le milieu est alors dit hétérogène. La simulation s'appuie alors souvent sur des approches qui utilisent l'optique géométrique. Dans la plupart des cas, les mécanismes d'interaction électromagnétique mis en jeu sont simulés à partir des propriétés optiques des couches du milieu, des propriétés optiques volumiques de ces couches, ou des propriétés optiques et géométriques des éléments discrets du milieu. Les principaux types de modèles (Tab. I.1) sont brièvement introduits ci-dessous.

	Théorie K-M	Solution intégrale,..	Modèle géométrique	Modèle discret et de suivi de rayons	Radiosité
MILIEU TURBIDE (mono/multi couche, turbide)	♣	♣		♣	
MILIEU HÉTÉROGÈNE (objets, densité 3-D variable,.)			♣	♣	♣

Tableau I.1 : Principaux types de modèles et milieux de propagation associés.

I.2.1 Modèles pour milieux turbides

Le milieu est supposé être constitué d'éléments (feuilles, etc.) absorbants et diffusants, distribués de manière homogène dans des couches horizontales. La notion d'homogénéité est

évidemment directement liée à l'échelle d'analyse. Elle implique en particulier qu'à cette échelle :

(1) la densité volumique d'éléments diffuseurs et d'absorbants est une constante. Le LAI d'un couvert est donc une constante en tout point du couvert.

(2) le milieu peut être découpé en éléments de volume à l'intérieur desquels les éléments intercepteurs ne peuvent se masquer. Cette hypothèse est nécessaire pour pouvoir utiliser l'équation du transfert radiatif.

(3) la distribution des éléments est aléatoire selon les directions verticales et horizontales.

La validité des hypothèses (1) et (2) permet de représenter le milieu de propagation par la superposition de couches homogènes horizontales et d'appliquer l'équation du transfert radiatif à toute couche. La transmittance de toute couche est égale à la transmittance en chacun des points de cette couche. Si de plus l'hypothèse (3) est valable alors le transfert radiatif peut être représenté par un système intégro-différentiel et une loi physique comme la transmittance moyenne est valable en tout point du milieu. La transmittance du milieu est en effet alors le produit des transmittances de toutes les couches. Ceci est typiquement le cas de l'atmosphère s'il est considéré une échelle d'analyse qui englobe un nombre suffisamment important de molécules gazeuses.

Il est possible de représenter une certaine variabilité spatiale du milieu selon l'axe vertical si ce dernier peut être représenté comme la superposition de plusieurs milieux homogènes. Le milieu est alors dit multi-couches. Bien évidemment, il est alors nécessaire de satisfaire les équations de continuité du rayonnement à l'interface des différents milieux homogènes.

L'architecture des milieux homogènes est décrite par des variables ou fonctions qui indiquent la quantité de matière présente, comme la densité volumique de biomasse ou le LAI, et l'orientation de cette matière (LAD). Certains modèles prennent plus ou moins en compte la taille des absorbants et des diffuseurs feuilles ainsi que les distances entre ces derniers. Les modèles pour milieux turbides s'avèrent être bien adaptés à l’étude de milieux denses et homogènes (*e.g.*, parcelles agricoles), avec des éléments de végétation petits en comparaison avec la hauteur de la canopée (Badhwar *et al.*, 1985).

Différentes méthodes de simulation du transfert radiatif ont été développées :

- Utilisation directe de l'équation du transfert radiatif.

  Cette approche (Ross, 1981 ; Myneni *et al.*, 1989 ; Gao, 1993) peut être employée avec des méthodes intégrales itératives telles que l'approximation des ordres successifs de diffusion (Myneni, 1991), combinées ou non avec le principe d'invariance (*i.e.*, l'ajout d'une fine couche de diffuseurs et absorbants au sommet d'un couvert est équivalent à l'ajout de cette couche au bas du couvert), ou encore la méthode de Gauss-Seidel si l'espace des directions est discrétisé (*i.e.*, quadrature de Gauss-Legendre combinée à une approche itérative), etc.

- Approximation du transfert radiatif de Kubelka et Munk.

  La propagation du rayonnement est représentée avec un système d'équations différentielles qui régissent un nombre très limité, en général inférieur à 4 ou 5, de flux ascendants et descendants (Allen et Richardson, 1968 ; Park et Deering, 1982 ; Suits, 1972 ; Verhoef, 1984 et 1985).

- Discrétisation de l'espace des directions de propagation.

  Le rayonnement ne peut se propager que selon un nombre fini de directions. Cette approche est souvent appelée "méthode des ordonnées discrètes". Elle a souvent été combinée à une discrétisation spatiale du milieu telle que la décomposition en couches horizontales homogènes (Idso et de Wit, 1970 ; Goudrian, 1977 ; Gerstl et Zardecki, 1985 ; Liang et Stralher, 1995). Le transfert radiatif entre couches et entre directions de propagation est simulé par des équations différentielles qui peuvent être utilisées avec des méthodes itératives telles que la méthode des éléments finis (Myneni, 1991), ou la méthode du doublement (Cooper *et al.*, 1982).

Les modèles qui simulent la diffusion volumique du milieu utilisent souvent des approximations (Henyey Greenstein, polynômes de Legendre, etc.) pour représenter la fonction de phase $\frac{P(\Omega_s,\Omega_v)}{4\pi}$ du milieu, c'est-à-dire la probabilité de diffuser selon une direction donnée (Ω_v) compte tenu de la direction (Ω_s) du flux intercepté. Dans le cas d'un milieu foliaire, la fonction de phase n'est pas rotationnellement invariante : elle ne dépend pas seulement de l'angle de phase entre les directions (Ω_s) et (Ω_v) mais aussi des directions (Ω_s) et (Ω_v). La représentation par un développement de polynômes de Legendre ou d'harmoniques sphériques n'est donc pas bien adaptée. Une solution, appelée "exact kernel" dans la terminologie

américaine, consiste à représenter la fonction de phase par une matrice comportant les coefficients de diffusion exacts pour un nombre limité de directions incidentes et de diffusion.

I.2.2 Modèles pour milieux hétérogènes

Ces modèles ont pour objectif de simuler le transfert radiatif et/ou la réflectance de milieux dont les éléments diffusants et absorbants peuvent être distribués de manière hétérogène selon les directions à la fois verticales et horizontales. Pour ces milieux, la loi de la transmittance moyenne peut donc ne pas être valable pour tous les points d'un même plan horizontal.

- Modèles géométriques

Le couvert est simulé par une surface, de FRD donné, parsemée d'objets géométriques (cylindre, sphère, etc.) dont les propriétés optiques (réflectance, transmittance, absorptance) sont supposées connues. En fait, seules les quantités "réflectance" sont souvent utilisées. Ainsi, la réflectance du couvert est généralement supposée être la somme des réflectances des surfaces éclairées et à l'ombre pondérées par leur surface efficace selon la direction d'observation (Ω_v). Ces surfaces, ainsi que leur distribution spatiale, sont calculées à l'aide de la dimension et de la distribution spatiale des objets, compte tenu des directions d'observation et d'éclairement. Différents auteurs ont montré que la réflectance d'un milieu est beaucoup plus dépendante des dimensions des objets (rapport des dimensions verticales et horizontales des couronnes et rapport des hauteurs de la couronne et d'arbre) que de leur forme (Egbert, 1977). Ainsi, il est souvent considéré qu'un arbre représenté par un tronc surplombé d'un houppier de forme ellipsoidalle fournit des solutions à la fois précises et faciles à obtenir (Stralher et Jupp, 1990).

Ces modèles (Egbert, 1977 ; Jackson *et al.*, 1979 ; Otterman, 1984 ; Li et Strahler, 1985 ; Jupp *et al.*, 1986 ; Deering *et al.*, 1990) représentent bien les réflectances des canopées très peu denses, telles que les savanes arbustives, les rangées de cultures espacées, etc, pour des directions d'éclairement et d'observation relativement faibles. En effet, les diffusions multiples entre éléments, de même que les effets d'ombre et de masquage entre éléments, pour les directions d'éclairement et d'observation, sont généralement négligés ou seulement partiellement pris en compte (Li et Stralher, 1992). Une contrainte majeure de ces modèles est qu'ils nécessitent une connaissance à priori des réflectances des objets à l’ombre et éclairés.

Les modèles hybrides sont une extension des modèles géométriques. Ils prennent au moins partiellement en compte la transmittance (Li et Strahler, 1988) des objets géométriques et les diffusions multiples (Li et Strahler, 1995) entre ces objets. Ces modèles (Verhoef et Bunnik, 1976 ; Suits, 1983 ; Norman *et al.*, 1985 ; Kimes *et al.*, 1986) ont tout d'abord été développés pour des milieux simples pour simuler les effets rangs, puis pour des milieux arborés quelconques (Li et Strahler, 1988 et 1995).

- Modèles discrets et de suivi de rayons

Ces modèles sont essentiellement numériques. Comparés aux autres types de modèles présentés ci-dessus, ils peuvent nécessiter des temps de calcul très importants. Leur principal intérêt est de simuler avec une très grande précision les trajets du rayonnement dans des milieux quelconques : milieu continu turbide, milieu discrétisé en tant qu'ensemble de surfaces et volumes diffusants opaques ou turbides, etc.

- *Modèles discrets* : ces modèles s'appuient sur une discrétisation de l'espace des directions de propagation selon un nombre N de directions. Ils peuvent opérer sur des scènes turbides et des scènes hétérogènes plus ou moins discrétisées (cellules élémentaires juxtaposées, volumes ou surfaces, etc.). Le transfert radiatif dans la scène peut être simulé avec ou sans suivi de rayon. Ainsi, Goudrian (1977) utilise un système d'équations intégro-différentielles dans le cas d'un milieu turbide multi-couche, alors que Myneni (1991) utilise la méthode des éléments finis pour simuler l'équilibre radiatif en tout point (cellule) d'une scène quelconque, turbide ou non, constituée par une matrice parallélépipédique de cellules cubiques. Par contre, Kimes et Kirchner (1982) utilisent la méthode de suivi de rayons dans des scènes représentées par une matrice de cellules cubiques.

- *Modèles de suivi de rayons* : ils consistent à suivre le trajet de rayons dans la scène étudiée. Le milieu de propagation peut être discrétisé ou non. Il peut être défini en tout point (x,y,z) de manière statistique (densité volumique d'absorbants et de diffuseurs, etc.), de manière exacte avec un nombre plus ou moins important de primitives géométriques (Govaerts, 1995 ; North, 1996) ou bien par une maille de discrétisation où chaque noeud est caractérisé par des propriétés optiques et structurales spécifiques .

En l'absence de discrétisation de l'espace des directions, les modèles de suivi de rayons sont surtout statistiques : l'obtention de résultats fiables requiert donc le suivi d'un grand nombre

de rayons. Un rayon correspond alors souvent à un seul photon. Par contre, si l'espace des directions de propagation est discrétisé, un rayon peut correspondre à un flux de photons (Kimes and Kirchner, 1982 ; Gastellu-Etchegorry *et al.*, 1996). Le modèle DART développé dans le cadre de cette thèse appartient à cette catégorie de modèles discrets avec suivi de rayons. L'intérêt principal de la discrétisation de l'espace des directions, par rapport à la prise en compte de toutes les directions, est de pouvoir simuler de manière beaucoup plus déterministe la propagation du rayonnement, ce qui a en général pour effet de diminuer les temps calcul.

Un intérêt majeur des modèles de suivi de rayons, avec ou non discrétisation de l'espace des directions, est de pouvoir faire intervenir de manière simple et précise les propriétés géométriques et optiques des éléments de la scène qui sont localement présents. La diffusion de tout rayon intercepté par les éléments de la scène donne lieu à une diffusion dont l'intensité et la distribution directionnelle dépendent respectivement de l'albédo de diffusion et de la fonction de phase de l'élément intercepteur. Pour les modèles discrets, la diffusion survient selon chacune des N directions de diffusion possibles, avec une intensité proportionnelle à la fonction de phase. Par contre, pour les modèles de suivi de rayons le rayonnement est diffusé en choisissant de manière aléatoire une direction de propagation, dans l'espace 4π (North, 1996), si l'espace des directions n'est pas discrétisé, ou parmi un nombre limité de directions (Pouzol, 1997), si l'espace des directions est discrétisé. Le choix de la direction est généralement effectué avec une méthode statistique qui prend en compte la valeur de la fonction de phase. Il est souvent utilisé la méthode de Monte Carlo. Cette dernière utilise une séquence de nombres aléatoires pour construire un échantillon et par suite un estimateur statistique du paramètre étudié, *e.g.* FRD ou APAR (Heermann, 1990). Un intérêt majeur de la méthode de Monte Carlo est de n'avoir à simuler que les diffusions d'ordre 1. Le trajet de tout rayon est en effet une suite de diffusions d'ordre 1. Par contre, la vitesse de convergence de cette méthode peut être une importante contrainte limitative. En effet, l'écart type du résultat final décroît comme $1/\sqrt{n}$, où n est le nombre de simulations réalisées pour simuler un même phénomène.

Selon les modèles, la fonction de phase se rapporte à des :

- éléments de surface constitutifs du milieu (Govaerts, 1995),
- éléments de volume microscopiques (Kimes et Kirchner, 1982 ; Gastellu-Etchegorry *et al.*, 1994) de cellules constituées par un milieu turbide. La description locale du milieu est alors partiellement statistique.
- cellules constitutives du milieu. Le transfert radiatif peut être simulé sans suivi de rayons avec la méthode des éléments finis (Myneni, 1991), ou avec le suivi de rayons en utilisant des équations du transfert radiatif spécialement adaptées aux cellules (Pinel, 1997).

- Modèles basés sur la radiosité

La radiosité est une méthode très utilisée en infographie (Sillion et Puech, 1994). Elle permet de résoudre l'équation du rendu (Kajiya, 1986), c'est à dire l'équilibre radiatif représenté par l'égalité des luminances incidentes, émises et réfléchies à la surface de tout objet de la scène. Cette méthode est bien adaptée pour simuler la diffusion de la lumière entre surfaces lambertiennes. Elle a cependant été adaptée au cas de propriétés optiques beaucoup plus réalistes. Par exemple, Chelle (1997) utilise des propriétés optiques qui correspondent à la superposition de propriétés lambertiennes et non lambertiennes, ces dernières étant représentées par un lobe gaussien. La méthode de radiosité requiert la connaissance de tous les facteurs de forme ; c'est à dire une quantité proportionnelle à l'angle solide sous lequel chaque élément du milieu voit tout autre élément du milieu. Le calcul de ces facteurs de forme est en général réalisé avec deux techniques : la projection géométrique ou bien le suivi de rayons combiné à la méthode de Monte Carlo. Il requiert l'essentiel du temps de simulation. Une fois ces facteurs de forme connus, la simulation du transfert radiatif se ramène à une représentation matricielle. La simulation peut donc être très rapide, même si les conditions d'éclairement et d'observation varient, la géométrie du couvert restant bien évidemment la même. Les deux principaux inconvénients de cette approche sont le calcul de l'ensemble des facteurs de forme ainsi que l'espace mémoire nécessaire pour stocker ces facteurs de forme (Borel *et al.*, 1991). Ces problèmes sont fortement diminués avec des adaptations telles que la méthode de radiosité dite progressive (Jessel *et al.*, 1993). Cette dernière consiste à calculer les facteurs de forme au moment où ils sont nécessaires pour résoudre le système linéaire qui représente l'équilibre radiatif.

Une approche originale, appelée "radiosité mixte" a été développée par Chelle (1997) pour l'étude spécifique des couverts végétaux. Cet auteur a couplé un modèle de radiosité avec un modèle de transfert radiatif "turbide", le modèle SAIL (Verhoef, 1984). Pour tout élément du couvert, le modèle SAIL calcule l'éclairement moyen dû aux diffuseurs éloignés, alors que le modèle de radiosité calcule précisément l'éclairement dû aux diffuseurs les plus proches. Cette approche offre l'avantage de réduire beaucoup les temps de calcul par rapport à des approches plus classiques reposant uniquement sur le lancé de rayons ou la radiosité.

II LE MODÈLE K-K

Le modèle DART développé dans le cadre de cette thèse est une extension de modèles antérieurs appartenant à la catégorie des modèles discrets et de suivi de rayons, pour lesquels le milieu de propagation du rayonnement est discrétisé en tant que matrice de cellules juxtaposées, de même dimension. Une telle matrice est appelée "maquette" ci-dessous. Le modèle K-K de Kimes et Kirchner (1982) a été un précurseur de ce type de modèles. De ce fait, ses principes fondamentaux sont brièvement résumés dans ce paragraphe. La théorie plus spécifique du modèle DART est décrite dans le paragraphe suivant et dans l'Annexe 1.

II.1 Représentation du milieu

Comme indiqué ci-dessus, le modèle K-K repose sur l'utilisation d'une maquette informatique qui représente le paysage sous la forme d'éléments de volume juxtaposés. Ces cellules sont caractérisées par leur dimension géométrique et par des paramètres biophysiques (LAI, LAD) et optiques (réflectance ρ_f et transmittance τ_f) foliaires. La structure du couvert est donc représentée par l'arrangement spatial des cellules. Ces dernières peuvent être uniquement de type "feuille" ou de type "sol". De manière à simuler une scène de dimension infinie, tout rayon qui sort selon une direction (Ω) par une face verticale de la scène re-rentre dans celle-ci selon la direction (Ω) par une cellule symétrique à la cellule de sortie. Cette possibilité de simuler un paysage infini périodique diminue donc les problèmes de conditions aux limites ainsi que les contraintes informatiques en termes de temps de calcul et de volumes de données à stocker.

II.2 Propagation de l'énergie dans la maquette

Chaque rayon transporte une certaine puissance. Ainsi, un rayon au point r qui se déplace selon la direction (Ω) est caractérisé par un "vecteur source" $W(r,\Omega)$ exprimé en watts. Si E_s est la constante solaire au-dessus de la scène et si $\Delta x.\Delta y$ est la surface horizontale d'une cellule du haut de la scène, l'on a : $W(r,\Omega) = E_s.\mu_s.\Delta x.\Delta y$. Tout rayon peut en fait être considéré comme un flux (W) de luminance $L(r,\Omega)$, qui se propage selon la direction (Ω, $\Delta\Omega$) dans un cylindre de section géométrique ΔS ($\Delta S=\Delta x.\Delta y.\mu$, où $\mu=\cos\theta$). La relation entre la puissance transportée et cette luminance est :

$$W(r,\Omega) = L(r,\Omega).\Delta\Omega.\Delta S.$$

$\Delta\Omega$: angle solide associé à la direction Ω.

Le modèle K-K simule l'éclairement de la scène comme la combinaison d'un éclairement solaire direct et d'un éclairement atmosphérique supposé isotrope. Les directions de propagation sont distribuées de manière régulière dans l'espace des directions. Le cas du rayonnement solaire direct est brièvement présenté ci-dessous.

Le rayonnement solaire direct est simulé par un ensemble de N sources primaires $W(0,\Omega_s)$ situées au-dessus du paysage. Le nombre N correspond au nombre de cellules de la face supérieure de la maquette informatique. Chaque source primaire donne lieu à la propagation d'une intensité spécifique $L(\Omega)$ selon une direction donnée. La puissance reçue par une cellule du haut de la maquette, due à un rayonnement incident $L(\Omega,\Delta\Omega)$, est $\Delta x.\Delta y.\int_{\Delta\phi} d\phi.\int_{\Delta\mu} |\mu|.L.d\mu$. La propagation du rayonnement dans le milieu correspond à la traversée de cellules. Dans chaque cellule, une partie du rayonnement incident est transmise et une partie est interceptée. L'énergie interceptée est stockée au centre de la cellule, en vue d'un destockage ultérieur. Il y a donc création de sources secondaires. Les diffusions multiples à l'intérieur de chaque cellule sont négligées. La diffusion d'une source d'ordre quelconque ne donne donc aucune interaction au sein de la cellule "émettrice". Une fois que toutes les sources primaires ont "déchargé" leur énergie, les sources secondaires déchargent leur énergie, ce qui donne lieu à l'apparition de sources tertiaires. La procédure s'arrête quand les sources n'ont plus ou quasiment plus d'énergie à décharger. L'ensemble du rayonnement a alors été absorbé et/ou réfléchi par le couvert. Cette approche permet le calcul de l'intensité et de la direction des flux qui sortent de chaque cellule du haut du couvert (*i.e.*, réflectance).

II.3. Interactions au sein des cellules "feuille"

Les mécanismes d'interaction dans les cellules sont définis par une fonction de phase volumique $\frac{P(\Omega_s,\Omega_v)}{4\pi}$ qui dépend des réflectances ρ_f et transmittance τ_f foliaires et du LAD. Ainsi, pour un rayonnement incident $W_{in}(0,\Omega_n)$ qui traverse selon la direction (Ω_n) une cellule (i) caractérisée par une densité volumique foliaire $u_f(i)$ et une distribution angulaire foliaire normalisée $\frac{g(i,\Omega_f)}{2\pi}$, *i.e.* LAD, on a :

- puissance transmise : $W_{trans}(\Delta l_i,\Omega_n) = T(\Delta l_i,\Omega_n).W_{in}(0,\Omega_n)$

  où $T(\Delta l_i,\Omega_n) = \exp[-G(i,\Omega_n).u_f(i).\Delta l_i]$ est la transmittance. Δl_i est le trajet dans la cellule (i). Le facteur géométrique $G(i,\Omega_n)$ indique la proportion de surface foliaire efficace selon la direction (Ω_n). $G(i,\Omega_n) = \frac{1}{2\pi}.\int_0^{2\pi} d\phi_f \int_0^1 g_f(i,\Omega_f).|\Omega_n.\Omega_f|.d\mu_f.$

- puissance interceptée : $W_{int}(\Delta l_i,\Omega_n) = [1 - T(\Delta l_i,\Omega_n)].W_{in}(0,\Omega_n)$

- puissance totale diffusée : $W_{diff}(\Delta l_i,\Omega_n) = \omega_f(\Omega_n).W_{int}(\Delta l_i,\Omega_n)$

  où $\omega_f(\Omega_n)$ est l'albédo moyen des feuilles comprises dans la cellule (i) éclairée selon (Ω_n). Cet albédo dépend des propriétés optiques des éléments foliaires ; *i.e.* transmittance et réflectance foliaire. Dans le cas où le modèle de réflectance et de transmittance foliaire est bi-lambertien (τ, ρ) : $\omega_f(\Omega_n) = \tau_f + \rho_f$. L'énergie totale diffusée/réfléchie selon la direction (Ω_v) est : $W_{int}(\Delta l_i,\Omega_n).\frac{P(\Omega_n,\Omega_v)}{4\pi}$. La fonction de phase est calculée avec :

$$\frac{P(\Omega_n,\Omega_v)}{4\pi} = \frac{\int \frac{g_f(i,\Omega_f)}{2\pi}.|\Omega_n.\Omega_f|.f(\Omega_f,\Omega_n\rightarrow\Omega_v).d\Omega_f}{G(i,\Omega_n)} \quad \text{où} \int_{4\pi} \frac{P(\Omega_n,\Omega_v)}{4\pi}.d\Omega_v = \omega_f(\Omega_n)$$

  La composante diffuse de la diffusion foliaire $f(\Omega_f,\Omega_n\rightarrow\Omega_v)$ est souvent représentée par un modèle bi-lambertien :

$$f(\Omega_f,\Omega_n\rightarrow\Omega_v) = \begin{cases} \frac{1}{\pi}.\rho_d(\Psi_{fn}).|\Omega_f.\Omega_v| & (\Omega_n.\Omega_f).(\Omega_f.\Omega_v) < 0 \\ \frac{1}{\pi}.\tau_d(\Psi_{fn}).|\Omega_f.\Omega_v| & (\Omega_n.\Omega_f).(\Omega_f.\Omega_v) > 0 \end{cases}$$

où $\int_{4\pi} f(\Omega_f,\Omega_n\rightarrow\Omega_v).d\Omega_v = \rho_d(\Psi_{fn}) + \tau_d(\Psi_{fn})$

II.4 PRINCIPALES LIMITATIONS DU MODÈLE K-K

Les principales limitations du modèle K-K sont dues aux hypothèses simplificatrices utilisées par ce modèle ainsi qu'à l'absence d'outils complémentaires (*e.g.*, création et visualisation de paysages simulés) indispensables pour une utilisation efficace et aisée du modèle. Les principales hypothèses simplificatrices du modèle K-K sont indiquées ci-dessous :

- non prise en compte de l'atténuation du rayonnement diffusé à l'intérieur des cellules,
- non prise en compte des diffusions d'ordre multiple dans les cellules,
- non prise en compte des phénomènes de rétrodiffusion ("hot spot"), de réflexion spéculaire et de polarisation,
- les propriétés optiques des feuilles d'un même arbre ne peuvent être différentes,
- le paysage est obligatoirement plat, sans relief,
- les directions de propagations du rayonnement sont équidistantes,
- le modèle ne fournit pas d'information 2-D, *i.e.* images,
- le rayonnement atmosphérique est isotrope.

III LE MODÈLE DART

III.1 Types de cellules

Les principales caractéristiques du modèle DART sont résumées ci-dessous. Une description plus détaillée est exposée dans l'Annexe 1. Le modèle DART utilise en entrée une maquette informatique (Fig. I.1) composée d'une matrice 3D de cellules parallélépipédiques identiques mais dont les dimensions en x, y, et z peuvent être différentes contrairement au modèle K-K. Cette amélioration permet de réduire le nombre de cellules nécessaires pour représenter une

scène et donc de réduire les temps calculs. Cette maquette est générée par un outil indépendant du modèle DART (Pinel, 1997).

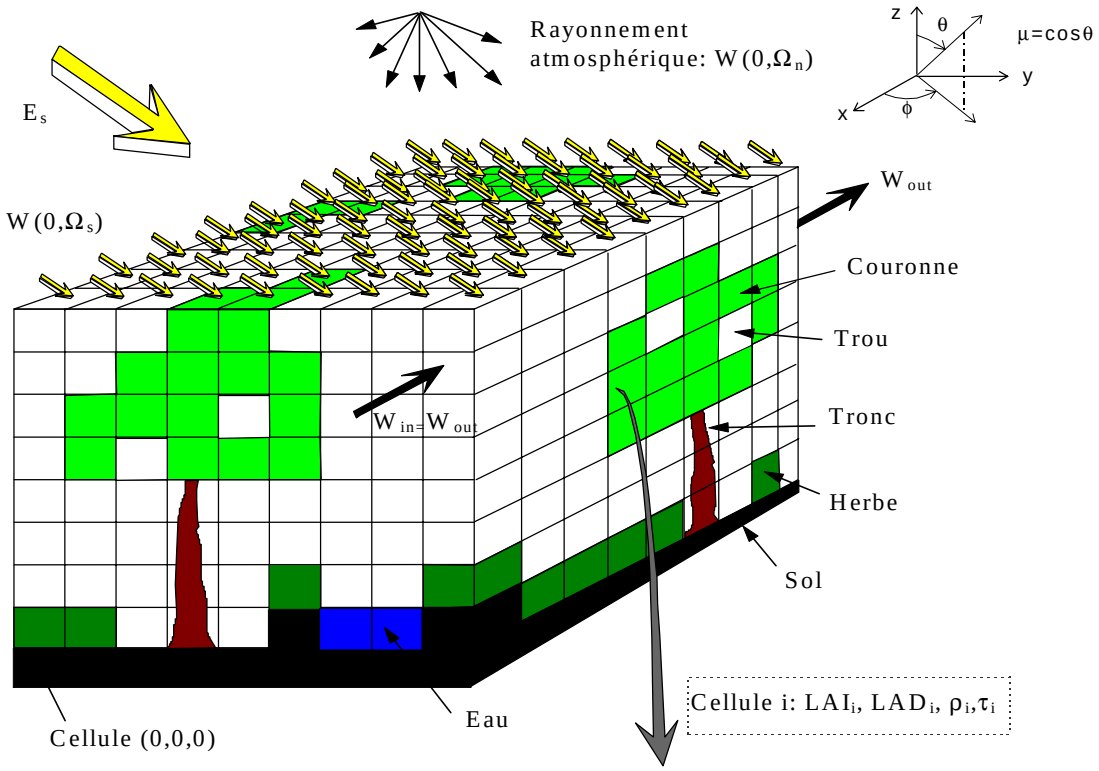


Figure I.1 : Maquette informatique utilisée en entrée du modèle DART.

Les cellules de la maquette (Fig. 1.1) peuvent être de types différents, c'est à dire avoir des propriétés optiques différentes, compte tenu des divers éléments présents dans le paysage étudié. Chaque cellule est cependant de type unique. Les principales catégories de cellules représentent les éléments suivants : "feuille", "sol", "tronc", "eau" et "sous bois". Plusieurs types de cellules peuvent appartenir à la même catégorie de cellules. Ainsi, il peut y avoir plusieurs types de cellules "feuille", *i.e.* cellules "feuille" avec des propriétés optiques ou structurales (LAI, LAD) différentes. Les cellules "feuille" sont utilisées pour représenter à la fois les éléments foliaires des houppiers et du couvert herbacé. Elles correspondent à des milieux turbides, *i.e.* nuage de feuilles, qui donnent lieu à des interactions volumiques. Inversement, les cellules "sol", "eau", "tronc" et "sous-bois" correspondent à des surfaces et donnent donc seulement lieu à des interactions de surface. Un type (j) de cellule est caractérisé de manière unique par une ou deux fonctions de transfert. Ces fonctions sont la fonction de phase pour

toutes les cellules et la fonction de transmittance pour les cellules non opaques, *i.e.* cellules "feuille" et "tronc". De manière à minimiser les temps de calcul au cours des simulations DART, ces fonctions sont pré-calculées par un outil complémentaire au modèle DART. Les fonctions de transfert sont déterminées à partir des propriétés géométriques et optiques des éléments représentés par le type de cellule.

- Cellules de type feuille

Les cellules de type feuille ou herbe sont assimilées à un nuage homogène de feuilles et sont donc considérées comme un milieu turbide dans lequel prennent naissance des mécanismes d'interactions volumique. Chaque cellule (i) est caractérisée par la fonction de transfert diffuse ($T(j,\Omega_s,\Omega_v)$) et la fonction de transmittance ($T(j,\Omega_s)$) du type (j) de cellules "feuille" à laquelle elle appartient et par une densité volumique foliaire $u_f(i)$. La fonction de transfert diffuse peut par exemple être calculée si l'on considère que les feuilles d'orientation (Ω_f) dans une cellule de type (j) sont caractérisées par une fonction de diffusion $f(j,\Omega_s \rightarrow \Omega_v,\Omega_f)$ et une distribution angulaire foliaire $\frac{g_f(j,\Omega_f)}{2\pi}$, *i.e.* LAD. Ainsi, une énergie interceptée $W_{int}(i,\Omega_s)$, dans le cas d'un rayonnement incident selon la direction (Ω_s), donne lieu à une énergie diffusée selon la direction (Ω_v) égale à :

$$W_{diff}(i,\Omega_v) = T(j,\Omega_s,\Omega_v)].W_{int}(i,\Omega_s)$$

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

D'autre part, après un parcours Δl_i dans une cellule de type j, de densité volumique foliaire u_f, un rayonnement incident est atténué et devient égal à :

$$W_{trans}(\Delta l_i,\Omega_n) = T(\Delta l_i,\Omega_n).W_{in}(0, \Omega_n)$$

où la fonction de transmittance $T(\Delta l_i,\Omega_n)$ est calculée à partir du LAD, de la direction du rayonnement incident sur la cellule et de la longueur du trajet de traversée du rayon (Δl_i).

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

où $T(j,\Omega_n) = \exp[-G(j,\Omega_n)]$ et $G(j,\Omega_n) = \frac{1}{2\pi}.\int_0^{2\pi} d\phi_f \int_0^1 g_f(j,\Omega_f).|\Omega_n.\Omega_f|.d\mu_f$

Les termes $T(j,\Omega_s,\Omega_v)$ et $T(j,\Omega_n)$ sont pré-calculés pour minimiser les temps calcul.

- Cellules de type sol

Les cellules de type sol sont considérés comme des milieux opaques qui ne donnent lieu qu'à des interactions de surface. Il existe plusieurs types de sols : lambertiens ou anisotropes. Les sols lambertiens sont caractérisés par une réflectance lambertienne alors que les sols anisotropes sont caractérisés par une fonction de diffusion $T(j,\Omega_s,\Omega_v)$. Ainsi, pour un vecteur puissance $W_{in}(\Omega_s)$ incident sur la face de normale (Ω_c) d'une cellule sol, la puissance diffusée $W_{diff}(\Omega_v)$ selon une direction Ω_v est : $W_{diff}(i,\Omega_v) = T(j,\Omega_s,\Omega_v).W_{int}(i,\Omega_s)$. Pour un sol de réflectance lambertienne l'on a : $T(j,\Omega_s,\Omega_v) = \frac{\rho_{sol}}{\pi}.|\Omega_c.\Omega_v|.\Delta\Omega_v$.

Les cellules de type "eau" sont traitées comme les cellules "sol", c'est à dire comme de simples surfaces totalement opaques et caractérisées par une fonction de phase.

- Cellules de type tronc

Les cellules de type tronc sont considérées comme des milieux semi-opaques. Elles sont caractérisées par une réflectance lambertienne ρ_{tronc} et par un coefficient d'interception proportionnel au rapport η des sections efficaces du tronc et de la cellule. Ainsi, pour un vecteur puissance $W_{in}(\Omega_s)$ incident sur la face d'une cellule tronc de normale (Ω_c), les puissances transmises $W_{trans}(\Omega_s)$ et diffusées $W_{diff}(\Omega_v)$ sont :

$$W_{trans}(\Omega_s) = (1-\eta).W_{in}(\Omega_s) \quad \text{et} \quad W_{diff}(\Omega_v) = \frac{\rho_{tronc}}{\pi}.|\Omega_v.\Omega_c|.\eta.W_{in}(\Omega_s)$$

- Cellules "sol + herbe"

Ces cellules sont traitées comme le sol. Leurs propriétés optiques sont calculées par un outil complémentaire au modèle DART. L'introduction de ces cellules a pour objectif de simplifier la construction des maquettes utilisées pour représenter le paysage. Ainsi, considérons le cas d'un milieu forestier constitué d'un couvert arboré et d'un sous bois comprenant de petits

arbres, de l'herbe et du sol. La création d'une maquette qui représenterait avec une même précision géométrique l'ensemble des éléments du couvert, c'est à dire le sous bois et le couvert arboré, implique que les cellules soient de très petite dimension car les éléments du sous bois sont généralement petits. Une solution consiste à réaliser une maquette très précise du seul sous-bois, ce qui permet de calculer le FRD, et donc la fonction de phase, du sous bois. Dans une deuxième phase, il est alors possible de réaliser une maquette avec des cellules dont la dimension est adaptée uniquement au couvert arboré. Le sous bois est alors représenté en tant que surface plane totalement opaque caractérisée par la fonction de phase calculée à l'étape précédente. Les cellules de la maquette peuvent donc être de plus grande dimension. Le nombre de cellules est alors diminué, ce qui permet de réduire les contraintes informatiques en temps de calcul et espace mémoire.

Catégorie de cellule	Caractéristiques	Mécanismes d'interactions
Sol Sol + herbe Eau	Fonction de transfert $T(j,\Omega)$	Milieu opaque $\Rightarrow$ interaction surfacique
Eléments foliaires (feuille ou herbe)	Densité foliaire $u_f(i)$ + Fonctions de transfert $T(j,\Omega)$ et $T(j,\Omega,\Omega')$	Milieu turbide $\Rightarrow$ interaction volumique
Tronc	$\rho_{tronc}(i) + \eta(i)$	Milieu semi-opaque

Tableau 1.2 : *Paramètres physiques nécessaires en entrée du modèle DART pour la description des mécanismes d'interactions des différents types de cellules (i). L'indice (j) indique le type de la cellule.*

L'utilisation de fonctions de transfert en entrée du modèle DART a pour objectif d'assurer une grande souplesse d'utilisation. Ainsi, les fonctions de transfert peuvent dériver de mesures ou être calculées par exemple avec un modèle de suivi de rayons. Cette approche peut être très intéressante si l'on souhaite représenter des milieux du type "feuilles + branches". Un modèle de suivi de rayons appliqué à une représentation très précise d'un milieu composé de branches et de feuilles peut en effet fournir les fonctions de transfert d'un tel milieu, qui lors d'une simulation ultérieure avec le modèle DART peut être simplement représenté par une cellule "feuille" caractérisée par ces fonctions de transfert.

Les maquettes utilisées par le modèle DART comprennent systématiquement une interface inférieure constituée de cellules "sol". Les fonctions de phase associées peuvent être quelconques : lambertiennes, isotropes, etc. Elles peuvent être calculées avec des modèles de sol classiques (Hapke, 1963 ; Pinty *et al.*, 1989). Dans le cas de sols lambertiens, la valeur de la réflectance des cellules "sol" peut être distribuée aléatoirement entre deux bornes définies par l'opérateur, de manière à simuler la variabilité naturelle de la réflectance des sols dans l'espace. En présence de relief, ces cellules ne sont pas disposées dans un plan horizontal mais dans l'espace 3-D à l'aide d'un modèle numérique de terrain. Dans ce cas, la fonction de phase du sol ne peut être que lambertienne.

Les cellules "sol" peuvent être surmontées par une ou plusieurs cellules "herbe". Le nombre de cellules "herbe" peut être constant sur l'ensemble de la maquette ou varier aléatoirement à partir d'une valeur moyenne et d'un écart type définis par l'opérateur. D'autre part, les cellules "sol" peuvent aussi être surmontées par des cellules "tronc", c'est à dire des cellules constituant la base des arbres. Tout arbre correspond à un nombre de cellules "tronc" empilées verticalement et surplombées par un volume connexe constitué de cellules "feuille" et de cellules "vide". Ce volume peut être de différentes formes : conique, sphérique, ellipsoïdal, etc. La proportion de cellules vides, c'est à dire le taux de remplissage γ du houppier, est définie par l'opérateur. Dans le cas d'un taux de remplissage de 100%, toutes les cellules "feuille" ont le même LAI. Par contre, un taux de remplissage inférieur à 1 signifie que certaines cellules sont vides et qu'il existe une variabilité du LAI des cellules au sein d'un même arbre. Cette variabilité a pour objectif de simuler le regroupement naturel ("clumping" en anglais) des éléments foliaires à l'intérieur des houppiers. Il est possible de définir le taux de remplissage en fonction du niveau vertical dans l'arbre. Cette option est utilisée pour simuler les profils verticaux de LAI au sein des arbres.

III.2 Types de paysages

Un paysage peut être constitué de plusieurs catégories d'arbres. Ces derniers se différentient par une ou plusieurs caractéristiques : dimensions des troncs et/ou houppiers, forme des houppiers, fonctions de transfert des cellules "feuille", taux de remplissage des houppiers, etc. Un même arbre peut comporter des cellules "feuille" de types différents. Ceci a pour objectif de permettre

la simulation de milieux arborés comprenant des feuilles d'ombre et de lumière, c'est à dire des éléments diffusants caractérisés par des propriétés optiques différentes. Les dimensions des troncs et houppiers peuvent varier à l'intérieur d'une même catégorie d'arbres. Les dimensions des arbres sont en effet définies par une moyenne et un écart type. Les arbres peuvent être distribués dans l'espace de manière statistique ou exacte. Les paysages ainsi créés sont appelés "paysages statistiques", "paysages exacts" et "paysages semi-exacts".

- Paysages statistiques

les arbres sont distribués de manière aléatoire dans des cercles de rayon r centrés sur les noeuds d'une grille de maille (Δx, Δy) selon les directions horizontale et verticale (Fig. I.2). Pour chaque noeud, la probabilité de présence d'un arbre est déterminée de manière aléatoire compte tenu d'une probabilité de présence "P" pré-définie. Le choix d'un rayon r relativement faible conduit à la constitution d'une maquette où les arbres sont systématiquement distribués le long de rangées. Ce type de maquette correspond par exemple à des plantations. Par contre, un grand rayon r permet de construire des maquettes correspondant à une distribution très désordonnée des arbres. D'autre part, le choix d'une probabilité P=1 implique la présence d'un arbre autour de chaque noeud, alors qu'une faible probabilité implique l'absence d'arbre en de nombreux noeuds. La valeur de P est directement liée à la régularité de la distribution spatiale du couvert arboré alors que la densité de noeuds multipliée par la probabilité P est égale à la densité d'arbres.

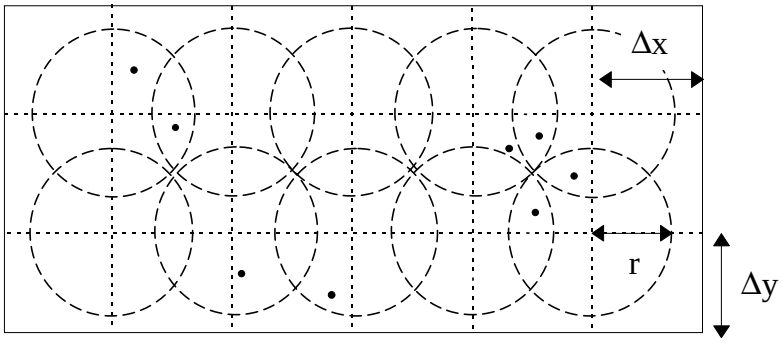


Figure I.2 : Exemple de distribution statistique de la position des arbres (•). Le taux de présence est 0.8.

Les dimensions des troncs et houppiers sont déterminées de manière statistique à partir d'une valeur moyenne et d'un écart type choisis par l'opérateur pour chaque catégorie d'arbre. Les

dimensions réelles sont en fait limitées à la valeur moyenne plus ou moins deux fois l'écart type de manière à éviter des dimensions aberrantes. De forts écarts types correspondent donc à des paysages dont la canopée a une topographie très irrégulière.

Il est possible de simuler des paysages qui comprennent plusieurs catégories d'arbres (*e.g.*, chênes et hêtres), c'est à dire des arbres dont une ou plusieurs caractéristiques structurales ou optiques diffèrent. Ces caractéristiques peuvent être les dimensions Δx et Δy de la grille, le rayon r, la probabilité de présence P, la moyenne et écart type des dimensions des troncs et houppiers, le profil de LAI et les fonctions de transfert.

- Paysage exact

Les caractéristiques (position, dimensions des troncs et houppiers, forme des houppiers, fonctions de transfert, etc.) des arbres sont définies de manière exacte par l'opérateur. Un simple fichier texte est alors utilisé pour stocker cette information. Il est important de noter que cette information peut dériver de mesures terrain ou bien d'un modèle géo-statistique totalement indépendant du modèle DART.

Ce mode de création de paysage est le plus souple. En effet, l'opérateur peut alors totalement contrôler toutes les caractéristiques des arbres. Ces caractéristiques peuvent être choisies plus moins exactement, et même de manière totalement aléatoire si l'on dispose de très peu d'informations.

- Paysage semi-exact

Comme dans le cas du paysage "exact" la position et la catégorie (forme du houppier, fonctions de transfert) des arbres sont définies de manière exacte à l'aide d'un simple fichier texte. Par contre, les dimensions des troncs et houppiers des arbres sont déterminées de manière aléatoire, compte tenu d'une moyenne et d'un écart type choisis par l'opérateur pour chaque catégorie d'arbre.

Ce mode de création de paysage est évidemment adapté au cas où seules la position et la catégorie des arbres (*i.e.* type des cellules "feuille") sont connues de manière exacte. Ces

paramètres peuvent cependant avoir été mesurés sur le terrain, choisis à priori par l'opérateur ou bien calculés avec un modèle géo-statistique.

III.3 Transfert radiatif et approche itérative

III.3.1 Transfert radiatif

L'équation générale du transfert radiatif (Hapke, 1993) pour une onde monochromatique stationnaire d'intensité spécifique $L(r,\Omega)$ en un lieu r et selon une direction (Ω) est :

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

μ, η et ξ sont les cosinus directeurs de la direction de propagation de l'onde selon les axes z, y et x, $\alpha(r,\Omega)$ est le coefficient d'extinction et $\alpha_d(r,\Omega' \rightarrow \Omega)$ est le coefficient de diffusion différentiel pour la diffusion de photons incidents selon la direction (Ω') et diffusés dans un angle solide unité centré sur la direction (Ω).

Le modèle DART résout l'équation intégro-différentielle précédente avec la méthode des ordonnées discrètes. La variable angulaire (Ω) est donc discrétisée en un nombre N de secteurs angulaires contigus, choisis par l'opérateur. Ils sont centrés sur les directions (Ω_n) et ont pour largeur angulaire $\Delta\Omega_n$. Les intervalles zénithaux et azimutaux des angles solides $\Delta\Omega_n$ sont respectivement notés $\Delta\theta_n$ et $\Delta\phi_n$. Dans la mesure où les secteurs angulaires $\Delta\Omega_n$ sont petits, avec $\Delta\theta_n$ et $\Delta\phi_n << 1$rd, et que le rayonnement diffusé n'est pas trop anisotrope, l'équation 3-D du transfert radiatif dans un repère cartésien est approchée par l'expression :

$$[\mu_n.\frac{d}{dz} + \eta_n.\frac{d}{dy} + \xi_n.\frac{d}{dx}]\ W(r,\Omega_n) = -\alpha(r,\Omega_n).W(r,\Omega_n) + \sum_{m=1}^{N} \alpha_d(r,\Omega_m \rightarrow \Omega_n).\Delta\Omega_n.W(r,\Omega_m)$$

où les vecteurs sources $W(r,\Omega_n)$ sont égaux aux termes $L(r,\Omega_n).\Delta\Omega_n.\Delta S$ où ΔS représente la surface efficace effective associée à la luminance $L(r,\Omega_n)$.

Les directions centrales des secteurs angulaires $\Delta\Omega_n$ correspondent aux directions "incidentes" et "diffuses" des flux énergétiques se propageant dans la maquette. Les fonctions de transfert sont calculées pour ces directions. Elles ne représentent donc pas les valeurs moyennes

associées aux secteurs angulaires. Cette approximation est justifiée par la faible valeur des secteurs angulaires $\Delta\Omega_n$.

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

L'ensemble des trajets possibles du rayonnement est calculé dans une étape préliminaire de manière à éviter des calculs répétitifs lors de la simulation du transfert radiatif dans la maquette. Ainsi, pour chaque direction (Ω_n) de propagation possible, le modèle DART calcule et stocke pour le rayon de direction (Ω_n) issu du centre de la cellule origine (0, 0, 0), ainsi que pour les 6 rayons issus du centre des 6 faces de cette cellule (0, 0, 0) :

(1) les indices de toutes les cellules traversées,

(2) la longueur de traversée Δl_i de toute cellule traversée, et

(3) les coordonnées du point d'entrée du rayon dans chaque cellule traversée.

Ce pré-calcul diminue beaucoup le temps de simulation car le trajet géométrique du rayonnement est toujours simulé à partir du centre des cellules pour les cellules de type feuille ou herbe (interactions volumiques) et à partir du centre des faces pour les cellules de type sol, tronc et eau (interactions surfaciques). Ainsi, les indices des cellules interceptées lors d'un trajet selon la direction (Ω_n) par un rayon issu d'une cellule (i, j, k) est égal au chemin suivi selon la direction (Ω_n) par un rayon issu de la cellule (0,0,0), à une translation (i, j, k) près. De même, les coordonnées des points d'entrée des cellules traversées sont aussi obtenues par une simple translation (i, j, k), alors que les longueurs de traversée des cellules sont égales.

III.3.2 Illumination

Deux sources d'illumination sont simulées : l'illumination solaire directe et l'illumination atmosphérique. Cette dernière peut être anisotrope, ce qui est le cas dans la réalité. La forte valeur du rayonnement atmosphérique pour des conditions atmosphériques normales, *i.e.* en général 5 à 40% du rayonnement total (Dave, 1978), souligne la nécessité de bien simuler l'éclairement atmosphérique.

Eclairement solaire direct : tous les flux incidents ont pour origine l'ensemble des cellules "vide" de la couche horizontale située juste au-dessus de la plus haute couche de la scène.

Chaque cellule émet un vecteur puissance $W(\Omega_n)$, exprimé en watts, correspondant au rayonnement solaire direct selon la direction (Ω_s) :

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

où $E_s(\Omega_s)$ est la constante solaire au sommet de la scène.

Eclairement atmosphérique : les vecteurs puissance qui représentent le rayonnement atmosphérique sont :

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

où $L_a(\Omega_n)$ est la luminance atmosphérique selon les directions descendantes (Ω_n), avec $n\in[1\ N']$. L'éclairement atmosphérique anisotrope est simulé à l'aide d'une distribution anisotrope d'intensités spécifiques $L_a(\Omega_n)$. Cette luminance peut être extrêmement anisotrope, suivant l'état les conditions atmosphériques. La prise en compte de cette anisotropie est extrêmement importante. Ainsi, dans des études de sensibilité Goudrian (1988) a mis en évidence le fait que la distribution du rayonnement atmosphérique peut davantage influencer la photosynthèse de couverts qu'un paramètre tel que le LAD. Le caractère très anisotrope du rayonnement atmosphérique est clairement illustré par les expressions de la luminance atmosphérique normalisée de Grant *et al.* (1997), en fonction du type de ciel :

- ciel clair : $L_a(\Omega_n) = 0.0361.[6.3 + \frac{1+\cos^2\Psi_{sn}}{1-\cos\Psi_{sn}}].[1 - e^{-0.31\sec\theta_n}]$
- ciel voilé et nuages hauts (>300m) : $L_a(\Omega_n) = 0.149 + 0.084\theta_n + 1.305.e^{-2.5\Psi_{sn}}$
- ciel voilé et nuages bas (<300m) : $L_a(\Omega_n) = 0.080 + 0.058\theta_n + 0.652.e^{-2.1\Psi_{sn}}$
- ciel voilé avec soleil complètement masqué : $L_a(\Omega_n) = 0.441.\frac{1+4.6.\cos\Psi_{sn}}{1+4.6}$

L'éclairement de toute cellule située au sommet de la maquette est donc :

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

Ci-dessous, tout vecteur source incident, selon une direction (Ω_n) avec $n\in[1\ \ N]$, sur une cellule i, avec $i\in[1\ \ I]$, est noté $W(0,\Omega_n)$. Le vecteur source transmis, après un trajet Δl_i dans la cellule i est noté $W(\Delta l_i,\Omega_n)$.

III.3.3 Propagation des rayons dans la maquette

Chaque rayon est suivi, au cours de son trajet dans la maquette, jusqu'à ce que son intensité devienne inférieure à un seuil pré-sélectionné ou qu'il sorte par le haut de la maquette. Dans ce dernier cas, le vecteur source est stocké en vue du calcul du FRD et des images directionnelles. Au cours de leur propagation dans la scène, les rayons interagissent avec les cellules. Les mécanismes d'interactions dépendent bien évidemment du type de cellule rencontrée : 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 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 diffuse tout ou partie de l'énergie interceptée à une étape antérieure.

L'ensemble des processus simulés dans le modèle DART est effectué en une étape préliminaire suivie par plusieurs étapes itératives (Fig. I.3) :

- *Illumination directe* : cette étape préliminaire correspond à l'illumination de la scène par le rayonnement solaire direct. Ce rayonnement est représenté par une couche de cellules émettrices au dessus de la maquette. Un rayon est émis selon la direction (Ω_s) par chaque cellule de cette couche. 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. Les énergies interceptées par les cellules non vides sont systématiquement stockées en vue d'une phase ultérieure au cours de laquelle les cellules qui ont intercepté de l'énergie deviennent des sources de rayonnement. Cette phase initiale d'illumination directe, appelée itération d'ordre 0, s'arrête quand tous les rayons solaires se sont propagés.

- *Etapes itératives* : au cours de l'itération k, les seules sources de rayonnement sont les cellules ayant intercepté de l'énergie au cours de l'itération (k-1) précédente. Le processus de destockage de l'énergie accumulée dans les cellules démarre à partir des cellules du bas de la maquette. Le rayonnement issu de ces sources est suivi dans l'ensemble de la maquette, pour toutes les N directions de diffusion possibles, jusqu'à ce qu'il sorte par le haut de celle-ci ou qu'il devienne inférieur à un seuil T_2 pré-défini. Le rayonnement intercepté au cours de ces trajets est stocké en vue d'une diffusion ultérieure. L'opérateur a la possibilité de choisir une procédure accélératrice telle que cette "diffusion ultérieure" puisse se produire au cours de la même itération (k) si la cellule interceptrice est localisée dans la maquette après la cellule

émettrice. Autrement, la diffusion se produit à l'itération (k+1) suivante. Le rayonnement qui sort de la maquette par les cellules du haut est stocké à chaque itération.

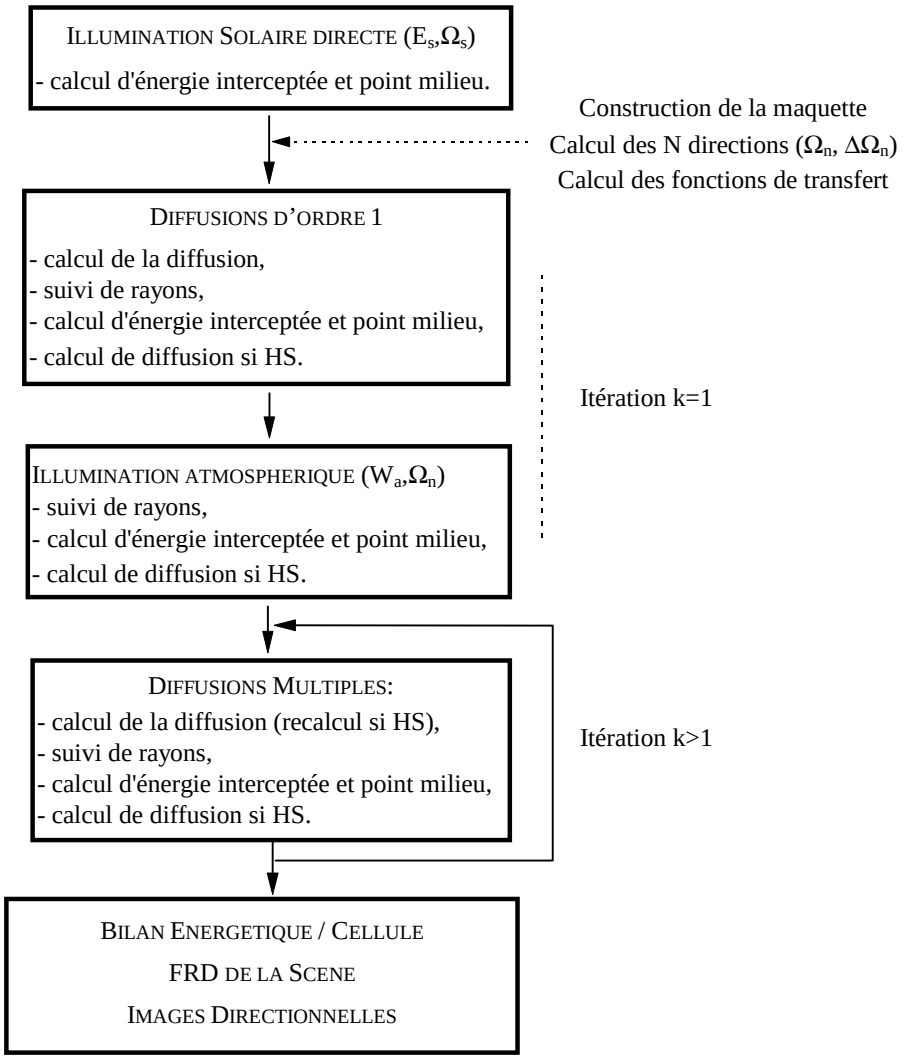


Figure 1.3 *: Organigramme du modèle DART. Le terme HS indique le cas où la méthode des harmoniques sphériques est utilisée pour représenter la distribution directionnelle de la diffusion.*

L'itération d'ordre 1 est particulière, car elle comprend la simulation de la diffusion du rayonnement solaire direct suivi par l'éclairement atmosphérique, représenté par une couche de cellules émettrices selon des directions descendantes, situées au sommet de la maquette. Un traitement spécifique est appliqué au rayonnement solaire intercepté lors de la phase préliminaire d'illumination solaire. L'objectif est en effet de calculer avec un maximum de précision la diffusion d'ordre 1 du rayonnement solaire direct, car cet ordre de diffusion représente généralement la composante prédominante du bilan radiatif dans le couvert. La

particularité du traitement réside dans le calcul de l'énergie diffusée à partir de l'énergie interceptée, compte tenu du fait que le rayonnement intercepté lors de la phase d'illumination solaire provient d'une seule direction.

III.4 Principales particularités du modèle DART

Par rapport à la plupart des autres modèles de transfert radiatif, en particulier par rapport au modèle K-K, le modèle DART présente des caractéristiques originales (Gastellu-Etchegorry *et al.*, 1996). Ainsi, l'éclairement atmosphérique peut être anisotrope, le relief est pris en compte, les diffusions multiples volumiques sont modélisées avec une grande précision, des images 2-D sont simulées, le sol peut être anisotrope, le rayonnement comportant une information biochimique foliaire est distingué de celui qui n'en comporte pas, etc. Quelques particularités majeures du modèle DART sont mentionnées ci-dessous.

III.4.1 Rayonnements "diffus foliaire" et "non diffus foliaire"

Le modèle DART possède une particularité intéressante pour les études concernant la biochimie foliaire des couverts observés par télédétection. En effet, ce modèle distingue (1) le rayonnement qui n'a jamais interagi avec le mésophylle (rayonnement non diffus foliaire : W_{nf}) des feuilles du couvert arboré et (2) le rayonnement qui a interagi au moins une fois (rayonnement diffus foliaire : W_{df}) avec le mésophylle foliaire. Le rayonnement total est donc : $W_t = W_{nf} + W_{df}$. Le rayonnement non diffus foliaire provient uniquement d'interactions avec le sol, les troncs, l'eau, l'herbe ou avec la surface externe des feuilles (*i.e.*, réflexion spéculaire). De plus, le rayonnement polarisé $W_p(\Omega)$ qui a été diffusé une seule fois, *i.e.* diffusion d'ordre 1, est calculé. La séparation des flux W_{nf} et W_{df} est réalisée simplement en considérant que la fonction de phase de tout type j de cellules "feuille" est égale à la somme de deux termes : $T_{df}(j,\Omega_s,\Omega_v)$ et $T_{nf}(j,\Omega_s,\Omega_v)$, respectivement associés à la diffusion volumique et surfacique foliaire. En l'absence de mesures précises de la diffusion foliaire de surface, j'ai modélisé cette diffusion comme une simple réflectance de Fresnel, pondérée par un facteur correcteur K qui représente la rugosité de la surface foliaire (cf. Annexe 1).

Dans le modèle DART, le rayonnement est donc représenté par un vecteur à trois composantes :

$$[W(\Omega), W_{nf}(\Omega), W_p(\Omega)] \qquad \text{où} \quad W(\Omega) = W_{df}(\Omega)+W_{nf}(\Omega)$$

Les trois composantes du vecteur [$W(\Omega)$, $W_{nf}(\Omega)$, $W_p(\Omega)$] subissent des modifications qui dépendent du type des cellules qui interceptent ce vecteur. Les différentes formulations associées sont indiquées dans l'annexe 1.

La possibilité de distinguer les rayonnements ayant interagi ou non avec le mésophylle des feuilles du couvert arboré est très intéressante en vue de la détermination des conditions optimales d'acquisition des données spatiales spectrométriques pour étudier la composition biochimique des couverts.

III.4.2 Diffusions au sein des cellules feuilles

En raison de son importance, la modélisation des interactions survenant au sein des cellules "feuille" (Fig. I.4) est résumée ci-dessous. L'accent est mis sur les diffusions d'ordre 1 et multiple. Il est considéré une cellule "feuille" (i) de type (j).

Dans le cas d'un vecteur source $W_{in}(\Omega_s)$ incident sur une cellule (i) selon une direction Ω_s, le rayonnement diffusé à l'intérieur de la cellule ($\mathbb{W}_1(\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v)$) selon une direction de diffusion Ω_v compte tenu de la direction incidente Ω_s est :

$$\mathbb{W}_1(\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v) = W_{int}(\Delta l_i,\Omega_s).T(j,\Omega_s, \Omega_v)$$

où $W_{int}(\Delta l_i,\Omega_s) = W_{in}(0,\Omega_s).[1 - T(\Delta l_i,\Omega_s)]$.

$T(j,\Omega_s,\Omega_v)$ est la fonction de transfert diffuse et $T(\Delta l_i,\Omega_s)$ est la fonction de transmittance.

Contrairement au modèle K-K, le flux $\mathbb{W}_1(\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v)$ n'est pas celui qui sort de la cellule : il est en partie atténué et diffusé par les éléments foliaires avant de sortir de cette cellule.

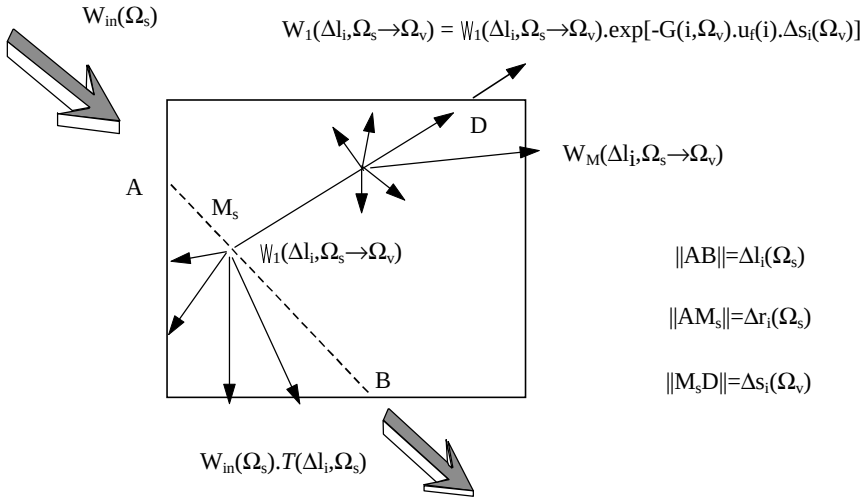


Figure 1.4 : Simulation des diffusions à l'intérieur d'une cellule "feuille".

- <u>Diffusions d'ordre 1</u>

De manière à simplifier le calcul des diffusions qui surviennent le long du trajet Δl_i (Fig. I.4) tout en conservant une bonne représentation de la diffusion totale, l'ensemble des diffusions d'ordre 1 dues à la propagation du flux incident le long du trajet Δl_i à l'intérieur de la cellule est modélisé comme une diffusion provenant d'un seul point (M_s), qualifié de "point milieu", situé sur le trajet Δl_i. Sa distance Δr_i à partir du point d'entrée de la cellule i est calculée comme étant la distance pour laquelle la puissance diffusée avant ce point sur la distance [0 Δr_i] est égale à la puissance diffusée après ce point, sur la distance [Δr_i Δl_i] :

$$W_{int}(\Delta r_i,\Omega_s) = \frac{1}{2}.\, W_{int}(\Delta l_i,\Omega_s)$$

La distance Δr_i est donnée par :

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

En appelant $\Delta s_i(\Omega_v)$ la longueur de propagation depuis (M_s) de l'onde diffusée selon la direction (Ω_v), il apparaît que la puissance diffusée d'ordre 1 selon (Ω_v) par la cellule i est :

$$W_1(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v) = \mathbb{W}_1(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)\ .\ \exp[-G(j,\Omega_v).u_f(i).\Delta s_i(\Omega_v)]$$

La puissance totale d'ordre 1 diffusée par la cellule est donc :

$$W_1(\Delta l_i,\Omega_s) = \int_{4\pi} \mathbb{W}_1(\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v).\exp[-G(j,\Omega_v).u_f(i).\Delta s_i(\Omega_v)].d\Omega_v$$

- <u>Diffusions multiples</u>

La somme des énergies interceptées $\mathbb{W}_{1,int}(\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v)$ sur les N chemins $\Delta s_i(\Omega_v)$, où $v \in [1\ N]$, au cours de la diffusion simple (Fig. I.3) donne lieu à des diffusions multiples à l'intérieur de la cellule.

$$\mathbb{W}_{1,int}(\Delta l_i,\Omega_s) = \sum_{v=1}^{N} [\mathbb{W}_1(\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v) - W_1(\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v)]$$

Le rayonnement intercepté $\mathbb{W}_{1,int}(\Delta l_i,\Omega_s)$ induit des diffusions multiples $W_{dM}(\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v)$ dont l'intégrale $W_M(\Delta l_i,\Omega_s)$ selon les directions de diffusion est calculée avec une série géométrique :

$$W_M(\Delta l_i,\Omega_s) = \mathbb{W}_{1,int}(\Delta l_i,\Omega_s).\{\omega_j.<T_i> + \omega_j.<T_i>.[\omega_j - \omega_j.<T_i>] + \omega_j.<T_i>.[\omega_j - \omega_j.<T_i>]^2 + ...\}$$

$$\Rightarrow\ W_M(\Delta l_i,\Omega_s) \approx [\frac{\omega_j.<T_i>}{1 - \omega_j.[1 - <T_i>]}].\mathbb{W}_{1,int}(\Delta l_i,\Omega_s)$$

ω_j est le coefficient moyen de diffusion pour du rayonnement diffus, dans la cellule (i) de type (j). Si le coefficient de diffusion des éléments de la cellule i est bi-lambertien, avec pour réflectance et transmittance hémisphérique ρ_j et τ_j alors : $\omega_j = \rho_{dj} + \tau_{dj}$.

$<T_i>$ est la moyenne des transmittances $T(\Delta s_i,\Omega_v)$, où $v \in [1\ N]$, entre le centre et les faces de la cellule (i).

De plus, il est supposé que la puissance diffusée selon (Ω_v) est proportionnelle à la transmittance de la cellule selon le trajet $(\Delta s_i(\Omega_v))$ depuis le point M_s, à la section efficace foliaire selon (Ω_v) et à la diffusion totale $W_M(\Delta l_i,\Omega_s)$ et à l'angle solide $\Delta\Omega_v$. Ainsi,

$$W_M(\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v) = W_M(\Delta l_i,\Omega_s).\frac{\exp[-G(j,\Omega_v).u_f(i).\Delta s_i(\Omega_v)].\sum_{s=1}^{N}\int_{2\pi} |\Omega_s.\Omega_f|.\frac{g_f(j,\Omega_f)}{2\pi}.f_j(\Omega_s \rightarrow \Omega_v,\Omega_f).d\Omega_f.\Delta\Omega_s.\Delta\Omega_v}{\sum_{v=1}^{N}\exp[-G(j,\Omega_v).u_f(i).\Delta s_i(\Omega_v)].\sum_{s=1}^{N}\int_{2\pi} |\Omega_s.\Omega_f|.\frac{g_f(j,\Omega_f)}{2\pi}.f_j(\Omega_s \rightarrow \Omega_v,\Omega_f).d\Omega_f.\Delta\Omega_s.\Delta\Omega_v}$$

En utilisant le terme $TG(j,\Omega_v) = \sum_{s=1}^{N} T(j,\Omega_s,\Omega_v).\ln[T(j,\Omega_s)].\Delta\Omega_s$, pré-calculé dans DART, on a :

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

La puissance totale diffusée selon la direction (Ω_v), due au flux incident $W_{in}(\Omega_s)$, est donc :

$$W(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v) = W_1(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v) + W_M(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$$

Chaque cellule peut être éclairée par $\mathbb{N}$ différents rayons se propageant selon la même direction (Ω_s). La puissance diffusée totale $W(i,\Omega_v)$ issue d'une cellule (i) est donc :

$$W(i,\Omega_v) = \sum_{n=1}^{\mathbb{N}} W(\Delta l_i(n),\Omega_s(n)\rightarrow\Omega_v) \qquad \text{avec } n\in[1\ \ \mathbb{N}]$$

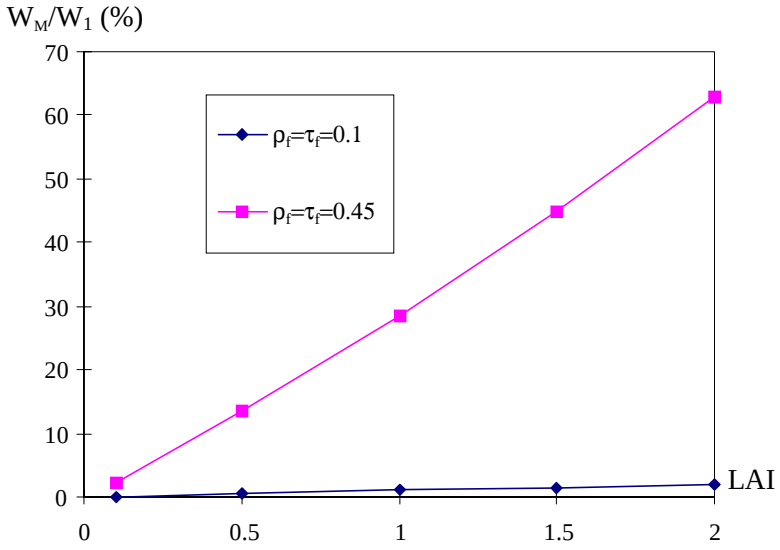


Figure I.5 : Rapport "$W_M(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)/W_1(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$" d'une cellule "feuille" en fonction du LAI dans la cellule. Deux cas sont considérés : ω_d=0.9 and ω_d=0.2. Le LAD est sphérique et la réflexion spéculaire est négligée.

La figure I.5 montre l'importance relative des diffusions d'ordre 1, $W_1(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$, et multiple, $W_M(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$, dans le cas d'une cellule "feuille" en tant que fonction du LAI de la cellule. La réflexion spéculaire est négligée. Le LAD est sphérique. Deux cas sont considérés : visible (ω_j=0.2, $\rho_d=\tau_d$=0.1) et proche infrarouge (ω_j=0.9, $\rho_d=\tau_d$=0.45). Il apparaît que $W_M(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$ est d'autant plus important par rapport à $W_1(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$ si le LAI et l'albédo foliaire ω_j sont forts. Ainsi, pour ω_j=0.9 et LAI=2, $W_M(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$ vaut 63% de

$W_1(\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v)$. Cette forte valeur du rapport "$W_M(\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v)$ / $W_1(\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v)$" souligne le fait que les diffusions multiples jouent un rôle très important et ne doivent donc pas être négligées, comme c'est le cas dans le modèle K-K (1982).

III.4.3 Représentation des diffusions aux itérations k>1

Le seul stockage de l'énergie interceptée par les cellules, et du point milieu pour les cellules "feuille", au cours de l'illumination solaire directe permet de calculer au cours de l'itération suivante l'énergie diffusée par toute cellule. En effet, la direction d'illumination solaire est unique et connue. Ce n'est pas le cas pour les itérations ultérieures. En effet, la connaissance de l'énergie interceptée n'indique pas la provenance de l'énergie incidente. La diffusion ne peut alors être calculée de manière exacte. Le modèle DART résout ce problème avec l'emploi de l'une des deux méthodes indiquées ci-dessous.

- *Méthode des harmoniques sphériques* :

  Lors de l'interception d'un rayon incident avec une cellule, la distribution directionnelle de l'énergie diffusée par la cellule est immédiatement calculée puis représentée à l'aide d'une décomposition en harmoniques sphériques. Seuls les premiers coefficients de cette décomposition sont stockés. Au cours de l'itération suivante, ces coefficients sont utilisés pour recalculer la distribution directionnelle de la diffusion. Cette approche a été validée dans le cas de milieux turbides homogènes (cf. Annexe 1). Elle présente un inconvénient majeur en raison de l'importance des temps de calcul requis pour effectuer la décomposition en harmoniques sphériques et pour recalculer le rayonnement à partir de cette décomposition. D'autre part, cette méthode est mal adaptée pour des milieux anisotropes ; *e.g.*, sol et/ou milieu foliaire avec un LAD planophile. Les deux méthodes barycentriques introduites ci-dessous permettent de beaucoup réduire la contrainte "temps calcul", avec une approche mathématique à priori moins rigoureuse mais qui donne de meilleurs résultats, compte tenu des approximations réalisées avec la méthode des harmoniques sphériques (HS).

- *Méthodes barycentriques* :

  Ces méthodes sont appelées Bary 1 et Bary 2. Elles permettent de calculer le rayonnement diffusé dans l'itération d'ordre (k+1) à partir de l'énergie totale interceptée et d'un point milieu moyen calculés préalablement, au cours de l'itération d'ordre (k) et au cours de la même itération (k+1) si l'opérateur utilise la procédure accélératrice qui permet de simuler

diffusions issues d'interceptions survenues au cours de la même itération. La méthode Bary 1 suppose que le rayonnement intercepté par la cellule provient d'un rayonnement incident qui était isotrope, alors que la méthode Bary 2 suppose que le rayonnement intercepté a une distribution isotrope, c'est à dire que la luminance du rayonnement incident était inversement proportionnelle au facteur géométrique $G(j,\Omega)$.

Le point milieu moyen d'une cellule est alors un simple barycentre calculé de manière itérative au fur et à mesure que des rayons interceptent cette cellule. Soient $W_{int}(m,k,i)$ et $M_s(m,k,i)$ respectivement l'énergie interceptée et le point milieu moyen de la cellule i calculés lors de l'itération (k) au bout de m interceptions avec des rayons incidents de directions quelconques. Appelons $(x_{m,k,i},y_{m,k,i},z_{m,k,i})$ les coordonnées de $M_s(m,k,i)$. L'interception par la cellule i d'un (m+1) ème rayon lors de l'itération (k) donne une énergie interceptée W_{int} et un point milieu $M_s(x,y,z)$. L'énergie totale interceptée $W_{int}(m+1,k,i)$ et les coordonnées $(x_{m,k,i},y_{m,k,i},z_{m,k,i})$ du nouveau point milieu sont donc :

$$W_{int}(m+1,k,i) = W_{int}(m,k,i) + W_{int}$$

$$x_{m+1,k,i}=\frac{x_{m,k,i}.W_{int}(m,k,i) + x.W_{int}}{W_{int}(m,k,i) + W_{int}},\ y_{m+1,k,i}=\frac{y_{m,k,i}.W_{int}(m,k,i) + y.W_{int}}{W_{int}(m,k,i) + W_{int}},\ z_{m+1,k,i}=\frac{z_{m,k,i}.W_{int}(m,k,i) + z.W_{int}}{W_{int}(m,k,i) + W_{int}}$$

Au cours de l'itération (k), l'énergie diffusée par toute cellule est calculée à partir de l'information stockée par la cellule. Ainsi, la méthode HS recalcule l'énergie diffusée totale $W(i,\Omega_v)$ directement à l'aide des coefficients de la décomposition en harmoniques sphériques. Par contre, avec les 2 méthodes barycentriques, l'approche consiste à calculer tout d'abord l'énergie $\mathbb{W}_1(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$ diffusée dans la cellule, à partir de la connaissance du barycentre M_s et de l'énergie interceptée par la cellule. Ainsi, on a :

$$\mathbb{W}_1(\Omega_v) = <T(j,\Omega_s,\Omega_v)>_{\Omega_s}.W_{int}(\Omega_s)$$

où $<T(\Omega_s\Omega_v)>_{\Omega_s}$ est la fonction de phase moyenne de la cellule selon la direction Ω_v. Cette fonction est pré-calculée dans DART au cours d'une phase préliminaire.

- Méthode Bary 1 : $<T(j,\Omega_s,\Omega_v)>_{\Omega_s} = \frac{1}{2\pi}.\sum_{s=1}^{N} G(j,\Omega_s).T(j,\Omega_s,\Omega_v).\Delta\Omega_s$

L'énergie incidente dans la phase d'interception précédente est donc supposée isotrope.

- Méthode Bary 2 : $<T(j,\Omega_s,\Omega_v)>_{\Omega_s} = \frac{1}{4\pi}.\sum_{s=1}^{N} T(\Omega_s,\Omega_v).\Delta\Omega_s$

L'énergie interceptée dans la phase d'interception précédente est supposée isotrope.

Dans les deux cas (Bary1 et Bary2), la puissance totale d'ordre 1 sortant de la cellule est :

$$W_1(i,\Omega_v) = \int_{4\pi} W_1(\Omega_v).\exp[-G(i,\Omega_v).u_f(i).\Delta s_i(\Omega_v)].d\Omega_v$$

La diffusion multiple $W_M(i,\Omega_v)$ est ensuite calculée de même qu'indiqué dans le paragraphe III.4.2. La diffusion totale est donc : $W(i,\Omega_v) = W_1(i,\Omega_v) + W_M(i,\Omega_v)$.

Une étude de sensibilité présentée dans le chapitre suivant montre que les méthodes barycentriques, à priori moins exactes, s'avèrent en pratique meilleures que la méthode HS.

III.4.4 Rétrodiffusion (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 opposée à la direction d'illumination de la scène. Ce phénomène est appelé "hot-spot" dans la terminologie américaine. Dans le modèle DART, ce phénomène est modélisé avec l'approche de Kuusk (1985). Une adaptation a été réalisée pour tenir compte du fait que les cellules ne sont pas des milieux plans infinis. 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 (M_s) et à la distance $\delta s_i(\Omega_v)$ de ce point, n'est plus $u_f(i).G(i,\Omega_v)$ mais :

$$\alpha(\Omega_s,\Omega_v,\delta s_i) = u_f(i).G(j,\Omega_v).[1 - \sqrt{\frac{G(j,\Omega_s).\mu_v}{G(j,\Omega_v).|\mu_s|}}.\exp[-\frac{\Delta(\Omega_s,\Omega_v)}{s_f}.\delta s_i(\Omega_v).\mu_v]]$$

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

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

Le phénomène du hot spot est très intéressant, car il est porteur d'une information sur la structure du couvert (Wenhan et Yuequin, 1994). Ainsi, il dépend de la taille, forme, densité, orientation et distribution spatiale des éléments foliaires. Le "hot-spot" n'est simulé que pour les diffusions d'ordre 1 car la source d'illumination directe, *i.e.* le soleil, est unique.

III.5 Sorties du modèle DART

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 de la couche supérieure de la maquette, le facteur de réflectance :

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

où (Ω_v) : direction d'observation d'angles zénithaux θ_v et azimutaux ϕ_v; $\mu_v=\cos\theta_v$.

$\frac{1}{\Delta x.\Delta y}.[W_s(z=H,\Omega_s) + \sum_{n=1}^{N} W_a(z=H,\Omega_n)]$: éclairement total de la maquette,

$\frac{1}{\Delta x.\Delta y}.\frac{W_{out}(z=H,\Omega_v)}{\mu_v.\Delta\Omega_v}$: luminance d'une cellule selon la direction (Ω_v).

Le modèle DART fournit également en sortie, des images directionnelles du couvert ainsi que la distribution 3-D de la fraction de rayonnement absorbé en tout point du couvert. De nombreux exemples de sorties sont donnés dans les chapitres suivants.

IV. FIABILITÉ ET TESTS DE VALIDITÉ DU MODÈLE DART

IV.1 Présentation

Ce paragraphe résume quelques travaux effectués pour évaluer l'erreur due aux deux approximations majeures du modèle DART, *i.e.* l'influence du mode de représentation des diffusions multiples et de la maille d'échantillonnage pour représenter les paysages, avec une indication du temps de calcul en fonction du nombre de cellules. Il présente aussi l'impact de la réflexion spéculaire foliaire sur la réflectance du couvert, et une analyse de la proportion de la réflectance (R_{df}) du couvert qui résulte de rayonnement ayant interagi avec le mésophylle foliaire. Toutes ces études ont été réalisées avec un milieu extrêmement simple, *i.e.* milieu turbide, avec un éclairement uniquement directionnel (SKYL=0). De plus, la réflectance du sol (ρ_{sol}) a généralement été supposée nulle. Le choix de ces conditions particulières a été guidé par la volonté de ne pas perturber la détection des phénomènes analysés avec des effets liés à la structure du couvert et/ou au rayonnement atmosphérique. Ainsi, contrairement à des milieux complexes tels que les forêts, un milieu homogène turbide ne possède pas de caractéristiques architecturales (*e.g.*, couronnes d'arbres, regroupement de feuilles en amas) susceptibles de

masquer, par exemple, les effets d'une mauvaise représentation des diffusions multiples sur le calcul du FRD moyen de la scène étudiée. De même, un rayonnement diffus incident tend à rendre isotrope le rayonnement qui se propage à l'intérieur de la maquette, ce qui peut masquer une éventuelle mauvaise représentation des diffusions multiples.

L'utilisation d'un milieu turbide homogène pour les travaux indiqués ci-dessus a autorisé la comparaison des FRD DART aux FRD simulés par le modèle SAIL (Verhoef, 1984). Cette possibilité est intéressante, car elle permet de tester la validité des simulations DART dans le cas particulier d'un milieu turbide homogène pour lequel le rayonnement diffus est isotrope. Le modèle SAIL assume en effet l'isotropie du rayonnement diffus (luminance $L(z,\Omega)=cste\ \forall\Omega$, pour tous les points de même altitude z) lors du calcul des paramètres optiques (coefficients d'extinction, de diffusion et d'absorption) associés aux flux diffus ascendants E^+ et descendants E^-. Ces paramètres sont utilisés pour estimer les diffusions d'ordre 2 et plus. L'isotropie de $L(z,\Omega)$ n'est en fait vérifiée que si les éléments foliaires sont lambertiens et strictement horizontaux. Elle est en particulier erronée si le LAD est érectophile. En effet, la luminance d'ordre 1 d'un couvert foliaire infini est proportionnelle au terme $\frac{P(\Psi_{sv})}{G(\mu_s).\mu_v+G(\mu_v).\mu_s}$ qui n'est isotrope que si les feuilles sont horizontales, car alors $P(\Psi_{sv})\equiv\mu_s.\mu_v$, $G(\Omega_s)=\mu_s$, et $G(\Omega_v)=\mu_v$. Le modèle SAIL n'est donc pas une référence exacte, même si le LAD est planophile, car alors toutes les feuilles ne sont pas horizontales. Ce modèle est cependant utilisé en tant que référence approximative pour tous les LAD dans le visible, du fait de la moindre influence des diffusions multiples dans ce domaine spectral, et pour le LAD planophile dans le proche infrarouge. Aucune hypothèse simplificatrice sur l'isotropie du flux déjà diffusé dans le milieu n'est utilisée avec l'approche DART HS. Par contre, cette hypothèse est employée dans l'approche DART Bary 1. Son influence sur la FRD du couvert est cependant beaucoup plus faible qu'avec SAIL, car la position du point milieu rend partiellement compte d'une éventuelle anisotropie du rayonnement incident sur chaque cellule de la maquette. De plus, cette hypothèse n'intervient pas au niveau du calcul de la transmission des flux. Ces remarques tendent donc à montrer que Bary 1 semble être plus précis que SAIL.

Finalement, ce paragraphe résume quelques travaux réalisés pour valider le modèle DART. La publication correspondante (Gastellu-Etchegorry *et al.*, 1997) est jointe dans l'annexe 2.

IV.2 Validité du mode de représentation des diffusions multiples

L'objectif a été de tester et de comparer la validité des approches barycentriques (Bary 1 et Bary 2) et des harmoniques sphériques (HS) pour simuler les diffusions multiples. Ce travail a été réalisé avec un milieu turbide foliaire de LAI égal à 4 avec un sol noir ($\rho_{sol} = 0$). Trois distributions angulaires foliaires (LAD) ont été employées : sphérique, planophile et érectophile. Les simulations ont été effectuées dans le visible ($\rho_f = \tau_f = 0.1$) et le proche infrarouge ($\rho_f = \tau_f = 0.45$), pour trois conditions d'illumination solaire : $\theta_s = 0°$, 30° et 60°, avec un SKYL nul. L'espace des directions de propagation du rayonnement a été subdivisé en 150 secteurs adjacents.

Les comparaisons entre les différentes simulations ont été effectuées pour les réflectances selon la direction verticale (nadir) ainsi que pour N' directions comprises dans le demi hémisphère solaire avant. La prise en compte de l'hémisphère avant a permis d'éviter les problèmes associés au fait que le hot spot est simulé de manière différente dans les modèles SAIL et DART. L'écart moyen est quantifié :

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{N'} (R_{SAIL} - R_{DART})^2 . \Delta\Omega_v}{\sum_{n=1}^{N'} \Delta\Omega_v}}$$

Les méthodes barycentriques utilisées par le modèle DART ont été développées pour minimiser les temps calcul. Leur principale caractéristique est de représenter l'ensemble du rayonnement diffusé à l'aide de la seule énergie totale interceptée et d'un point milieu moyen, appelé barycentre énergétique. Notre problème se posait en ces termes : est-ce que la précision des réflectances simulées avec la méthode barycentrique est supérieure, inférieure ou égale à la précision des réflectances simulées avec la méthode des harmoniques sphériques si cette dernière utilise un nombre raisonnable de coefficients, c'est à dire un nombre inférieur à 9? Quelques résultats sont présentés ci-dessous (Tab. I.3 et I.4, et Fig. I.6).

La figure I.6 illustre les FRD visible et proche infrarouge dans les plans solaires principal et perpendiculaire pour θ_s=30° et avec un LAD planophile, simulés avec les modèles DART (Bary1, Bary2 et HS) et SAIL. Ces courbes permettent de vérifier l'existence dans le plan principal d'un fort effet de rétrodiffusion pour θ_v=-30° et d'un léger minimum de la réflectance près de la direction θ_v=+60°. D'autre part, dans le plan perpendiculaire la réflectance du couvert est relativement constante ($\rho_{VIS} \approx 0.0495$, $\rho_{PIR} \approx 0.45$). Le tableau I.3 donne les réflectances SAIL

et DART (Bary 1, Bary 2 et HS) au nadir (θ_v=0°) dans le visible et le proche infrarouge, pour trois directions zénithales solaires (θ_s=0°, 30°, 60°) et pour trois LAD foliaires (sphérique, planophile, érectophile). Le cas (θ_s=0°) est évidemment impossible pour certaines régions terrestres trop éloignées de l'équateur. D'autre part, le tableau I.4 indique pour un zénith solaire (θ_s=30°) et pour trois LAD foliaires (sphérique, planophile, érectophile) les écarts moyens (ε) entre les réflectances DART (Bary1, Bary2 et HS) et SAIL, pour l'ensemble des directions d'observation avec un angle zénithal inférieur à 50°. Cette valeur angulaire limite a été sélectionnée en raison de l'angle d'ouverture des capteurs spatiaux à grand champ de vue (*e.g.*, NOAA AVHRR : ±55.4°, Végétation sur SPOT 4 : ±50.5°). Les FRD SAIL et DART (Bary1, Bary2 et HS) sont très similaires (Fig. I.6), avec cependant quelques faibles différences significatives. Ainsi, l'ensemble des résultats (Tab. I.3 et I.4, et Fig. I.6) révèle la supériorité quasi systématique de la méthode Bary 1 par rapport aux méthodes Bary 2 et HS. Quelques explications et commentaires sont donnés ci-dessous.

La méthode des harmoniques sphériques est la méthode la moins précise. Dans le cas d'un zénith solaire égal à 30° (Tab. I.4), cette méthode donne des écarts relatifs (ε/ρ_{SAIL}) similaires dans le visible et le proche infrarouge ; *i.e.* de l'ordre de 0.3% pour un LAD sphérique, de 4% pour un LAD planophile et de 13% pour un LAD érectophile. La similitude de l'ordre de grandeur des différences relatives dans le visible et le proche infrarouge peut surprendre compte tenu de la plus grande importance des diffusions multiples dans le proche infrarouge. En fait, les écarts absolus dus à une représentation des diffusions multiples avec un nombre limité d'harmoniques sphériques sont effectivement plus importants dans le proche infrarouge que dans le visible (≈facteur 10). Par contre, les réflectances proche infrarouge sont environ dix fois plus élevées que dans le visible, ce qui explique que les différences relatives (ε) aient le même ordre de grandeur dans ces deux domaines spectraux.

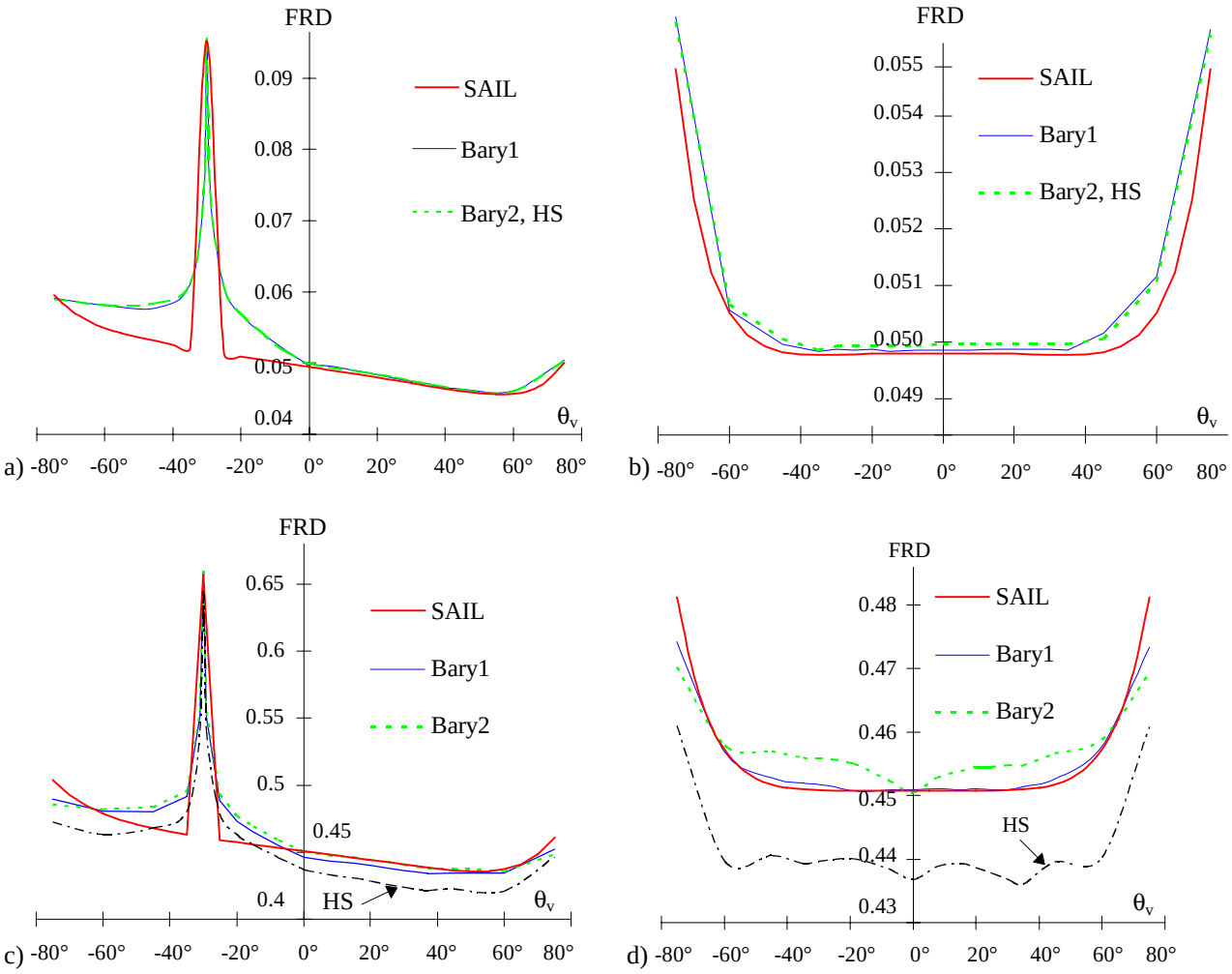


Figure I.6 : FRD visible (a,b) et proche infrarouge (c,d) de milieu turbide simulé avec modèles SAIL et DART (Bary1, Bary2, HS). θ_s=30°. LAI=4. ρ_{sol}=0. LAD planophile. Plan principal (a,c) et plan perpendiculaire (c,d).

Les écarts (ε) (Tab. I.3) associés à la méthode HS sont sensibles à la direction solaire, à l'exception du cas d'un milieu avec un LAD sphérique. Cette tendance est facilement compréhensible, car pour une même direction d'observation, l'importance du rôle des diffusions multiples par rapport aux diffusions d'ordre 1 dépend de l'angle solaire et du LAD. Ainsi, pour une observation au nadir avec un LAD planophile, la plus faible contribution relative des diffusions multiples survient pour un éclairement solaire direct au nadir, c'est à dire dans une configuration dans laquelle la fonction de phase $\frac{P(\Omega_s,\Omega_v)}{4\pi}$ tend à être maximale. Ceci explique que pour un LAD planophile, l'écart relatif sur la réflectance au nadir, visible et proche infrarouge, augmente quand θ_s passe de 0° (<1%) à 60° (>2%).

a)

θ_s=0°	SAIL	DART		
LAD		Bary1	Bary2	HS
Sphérique	0.0618/0.457	0.0619/0.457	0.0619/0.457	0.0619/0.457
Planophile	0.0908/0.636	0.0910/0.636	0.0914/0.640	0.0916/0.640
Erectophile	0.0166/0.150	0.0165/0.149	0.0167/0.149	0.0164/0.165

b)

θ_s=30°	SAIL	DART		
LAD		Bary1	Bary2	HS
Sphérique	0.0357/0.347	0.0355/0.346	0.0351/0.346	0.0356/0.345
Planophile	0.0494/0.451	0.0495/0.450	0.0496/0.449	0.0496/0.436
Erectophile	0.0140/0.170	0.0141/0.171	0.0144/0.175	0.0146/0.198

c)

θ_s=60°	SAIL	DART		
LAD		Bary1	Bary2	HS
Sphérique	0.0366/0.366	0.0364/0.368	0.0362/0.368	0.0363/0.365
Planophile	0.0501/0.456	0.0504/0.456	0.0510/0.447	0.0514/0.443
Erectophile	0.0178/0.201	0.0176/0.210	0.0180/0.215	0.0186/0.237

Tableau I.3 : Réflectances nadir (visible / proche infrarouge) d'un milieu foliaire turbide simulées avec SAIL et DART (approches Bary1, Bary2 et HS). LAI=4. LAD sphérique, planophile et érectophile. ρ_{sol}=0. a.) θ_s=0°. b.) θ_s=30°. c.) θ_s=60°.

Les différences relatives (ε) commises avec la méthode HS sur la réflectance sont toujours relativement faibles dans le cas de LAD sphérique. Ainsi, pour la réflectance au nadir, cette différence est <0.9% dans le visible et le proche infrarouge. Elle est un peu plus élevée pour un LAD planophile (<2.6% dans le visible et <3.6% dans le proche infrarouge), et peut être beaucoup plus élevée pour un LAD érectophile (<6% dans le visible et <20% dans le proche infrarouge). Le fait que les meilleurs résultats obtenus avec la méthode des harmoniques sphériques surviennent dans le cas d'un LAD sphérique est logique : par rapport à un LAD planophile ou érectophile, un LAD sphérique implique une plus grande isotropie des intensités $W(\Omega_v)/\Delta\Omega_v$ ($W.sr^{-1}$) diffusées par cellule, ce qui rend plus exacte la décomposition en harmoniques sphériques avec un nombre limité d'éléments. En effet, en présence d'un rayonnement diffusé réellement isotrope, la décomposition en harmoniques sphériques nécessite un seul terme. Par contre, avec des LAD non sphériques, l'intensité diffusée par les cellules est

beaucoup moins isotrope et la décomposition en harmoniques sphériques doit donc comprendre un nombre de termes beaucoup plus élevé pour assurer une bonne représentation de la distribution directionnelle de la diffusion. Il s'avère que ce nombre de termes est en pratique obligatoirement limité en raison de contraintes informatiques (volume de stockage et temps calcul). Ceci explique les résultats nettement moins bons obtenus avec la méthode des harmoniques sphériques dans le cas de LAD non sphériques.

θ_s=30°	DART (ε)		
LAD	Bary 1	Bary 2	HS
Sphérique	$1.4\ 10^{-4}/3.3\ 10^{-4}$	$2.0\ 10^{-4}/3.3\ 10^{-3}$	$1.0\ 10^{-4}/\ 1.0\ 10^{-3}$
Planophile	$1.4\ 10^{-4}/\ 6.3\ 10^{-4}$	$2.2\ 10^{-4}/\ 7.1\ 10^{-3}$	$1.9\ 10^{-3}/\ 1.5\ 10^{-2}$
Erectophile	$1.9\ 10^{-4}/\ 6.7\ 10^{-4}$	$2.8\ 10^{-4}/8.9\ 10^{-3}$	$2.2\ 10^{-3}/\ 3\ 10^{-2}$

Tableau I.4 : Ecart moyen (ε) entre les FRD de SAIL et les FRD DART Bary 1, Bary 2 et HS, dans le visible et le proche infrarouge, avec θ_v<50°. LAD sphérique, planophile et érectophile. θ_s=30°.

Dans le visible, avec un zénith solaire égal à 30°, la méthode Bary 1 donne une différence relative (ε) de l'ordre de 0.4% pour un LAD sphérique, de 0.3% pour un LAD planophile et de 1.4% pour un LAD érectophile (Tab. I.4). Dans le proche infrarouge les écarts relatifs correspondants sont respectivement 0.1%, 0.1% et 0.4%. Les ordres de grandeur des différences associées à Bary 1 sont très peu sensibles à la direction solaire. Pour toutes les directions solaires et pour tous les LAD, la méthode Bary 2 donne des écarts relatifs nettement inférieurs à ceux de HS et légèrement supérieurs à ceux de Bary 1. La supériorité de la méthode Bary 1 par rapport à la méthode Bary 2 était prévisible, car contrairement à Bary 2 et de même que SAIL, la méthode Bary 1 utilise l'hypothèse d'un flux diffus isotrope. Les écarts relatifs entre Bary 1 et Bary 2 sont cependant toujours faibles, à l'exception du cas du proche infrarouge avec un couvert érectophile et θ_s=60° (écart relatif ≈ 7.5%). Ces faibles écarts illustrent le fait que DART n'utilisent que très partiellement l'hypothèse d'isotropie du rayonnement déjà diffusé. De plus, il est important de remarquer que les différences entre les méthodes Bary 1, Bary 2, et même HS, sont toujours très faibles par rapport aux variations de réflectance associées à la structure de couverts hétérogènes tels que les forêts (Kimes et Sellers, 1985).

En résumé, les trois méthodes (Bary1, Bary2 et HS) sont quasiment identiques dans le visible et le proche infrarouge si le LAD du couvert est sphérique. Dans tous les autres cas, les écarts sont relativement faibles. La méthode Bary 1 donne les plus petits écarts. Son principal intérêt, par rapport à la méthode HS, réside dans l'amélioration des temps de calcul. Ainsi, pour une maquette comportant 1000 cellules non vides, le temps de simulation du FRD et des images directionnelles est 1h45' avec la méthode HS et 3' avec la méthode Bary 1. Cette dernière méthode a donc été choisie pour l'ensemble des travaux présentés par la suite.

IV.3 Influence de la maille d'échantillonnage de la maquette

L'énergie diffusée par une cellule "feuille" est calculée à l'aide du point milieu, mais le trajet géométrique des rayons est calculé à partir du centre de chaque cellule, en utilisant l'ensemble de trajets possibles, pré-calculés à partir du centre de la cellule (0,0,0). Cette méthode diminue beaucoup les temps de calcul, car elle permet d'éviter le calcul du trajet exact pour chaque rayon. En contrepartie, cette méthode entraîne des erreurs d'approximation sur le trajet réel des rayons, et par suite sur le FRD de la scène.

Un problème important avant de réaliser des simulations DART est donc de déterminer la maille d'échantillonnage optimale. Le terme "optimal" indique un maillage qui minimise le temps calcul, *i.e.* plus grandes cellules possibles, et tel que l'erreur commise par rapport à un maillage infiniment petit, et donc supposé idéal, est inférieure à un niveau d'erreur préalablement spécifié. Bien évidemment, le choix de la maille d'échantillonnage est fonction des dimensions des éléments du paysage. Ainsi, il est préférable de représenter avec de petites mailles d'échantillonnage des paysages qui comportent des éléments de faible dimension. Cependant, en dehors de ces considérations purement géométriques le choix de la maille d'échantillonnage dépend aussi de la quantité de matière diffusante et absorbante qui se trouve dans les cellules "feuille" ; *i.e.* le LAI des cellules. En effet, toute erreur commise sur le trajet d'un rayon a des conséquences d'autant plus importantes que cette erreur se produit dans une cellule qui contient une importante quantité de diffuseurs et d'absorbants foliaires ; c'est à dire une cellule dont le LAI est élevé. Ce problème est très contraignant, car il intervient de manière répétitive lors de la diffusion qui survient dans chaque cellule.
Le travail présenté a donc pour objectif de montrer la dépendance de l'erreur commise sur le FRD et l'albédo en fonction de la maille d'échantillonnage, et plus exactement du LAI par

cellule. Le LAI du milieu a été pris égal à 4. Les conditions d'illumination sont : $\theta_s = 30°$ et SKYL = 0. Trois types de LAD ont été considérés : sphérique, planophile et érectophile. La variation de la maille d'échantillonnage permet de représenter la scène avec un plus ou moins grand nombre de cellules, c'est à dire avec différentes valeurs de LAI par cellule. Il en résulte que le LAI des cellules "feuille" est inversement proportionnel au nombre de cellules selon l'axe vertical et par suite inversement proportionnel à la maille d'échantillonnage.

La figure I.7 représente l'influence de la maille d'échantillonnage sur les FRD DART visible et proche infrarouge dans le plan solaire principal, avec $\theta_s = -30°$, dans le cas de LAD planophile et érectophile. Les FRD SAIL servent de référence. Les simulations DART ont été réalisées avec des mailles d'échantillonnage de 10cm à 90cm, c'est à dire avec des LAI par cellule (LAI_c) qui varient entre 0.16 et 0.8. De manière classique, les FRD DART et SAIL présentent un effet de rétrodiffusion centré sur l'angle zénithal $\theta_v = -30°$. D'autre part, un fort minimum local survient dans le plan principal pour $\theta_v \approx +30°$, si le LAD est sphérique. Avec un LAD planophile, ce minimum est beaucoup moins prononcé, et survient pour $\theta_v \approx +60°$. Cette différence de comportement pour les LAD planophile et sphérique est simplement expliquée par la fonction de phase foliaire.

Il apparaît que les FRD DART sont systématiquement supérieurs aux FRD SAIL et que cette différence tend vers zéro quand LAI_c devient petit (Fig. I.7). Cette tendance peut être facilement expliquée. En effet, pour toute direction solaire oblique l'éclairement "direct" de chaque cellule de la maquette du modèle DART correspond à un ou plusieurs trajets à l'intérieur de la cellule. L'énergie, et par suite la réflectance, mesurée au sommet de la maquette résulte donc de la somme de une ou plusieurs contributions. Ces dernières sont égales à l'énergie qui est diffusée à l'intérieur de la cellule le long du ou des trajets des rayons solaires incidents et qui est transmise jusqu'au haut de la maquette. Il s'avère que pour un milieu homogène le rayonnement qui résulte de la transmission de deux flux diffusés, *i.e.* cas du modèle DART, est généralement supérieur au rayonnement qui résulte de la transmission d'un flux diffusé unique assimilé à un flux moyen, *i.e.* cas du modèle SAIL. Cette affirmation est démontrée ci-dessous, dans le cas d'un milieu simple, en considérant les diffusions d'ordre 1 qui surviennent dans la couche supérieure du milieu.

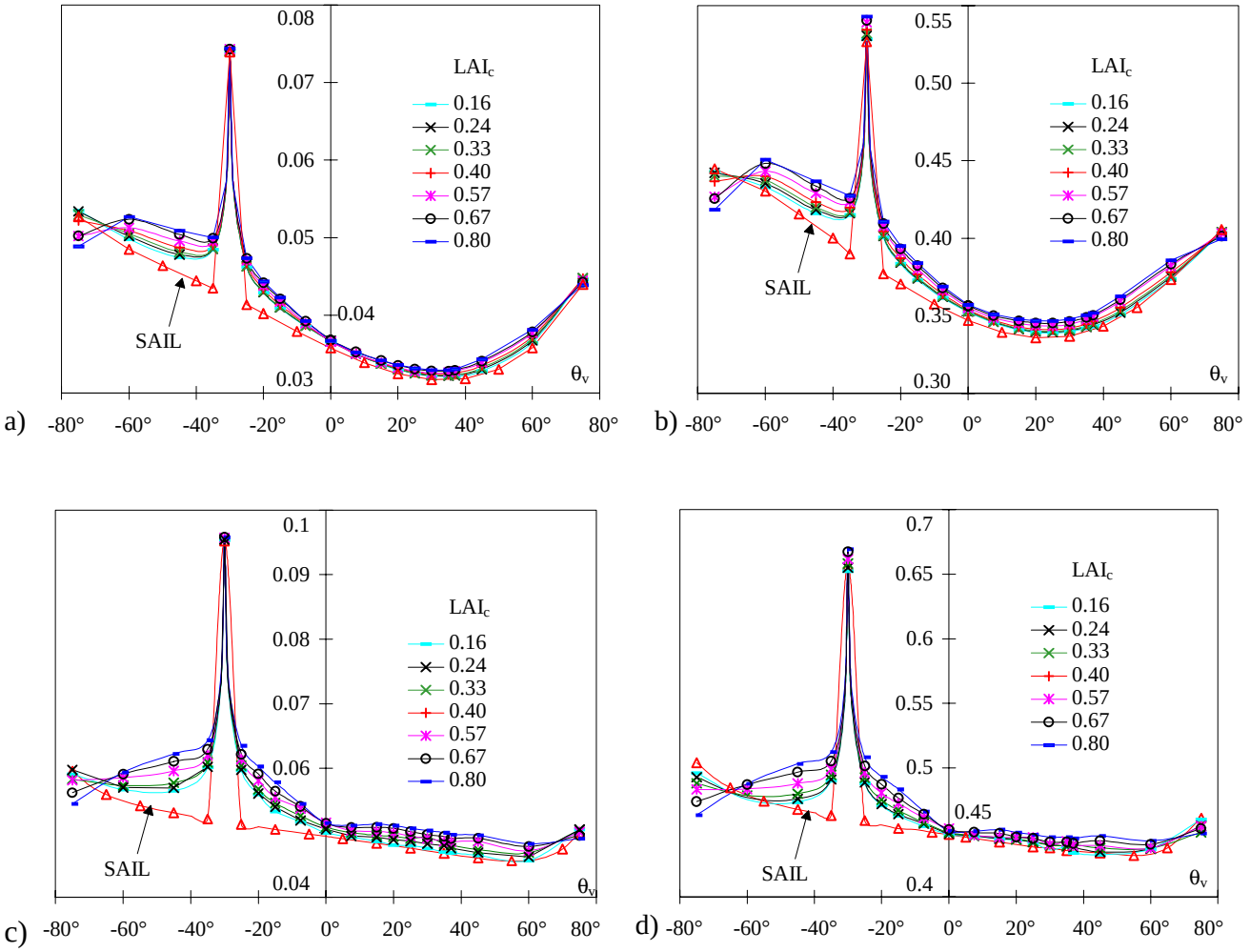


Figure I.7 : Réflectances DART (plan principal) d'un milieu turbide (LAI=4) représenté par des cellules dont le LAI varie de 0.16 à 0.8. θ_s=30°. ρ_{sol}=0. Visible (a, c). Proche infrarouge (b, d). LAD sphérique (a, b) et planophile (c, d). Le FRD simulé avec le modèle SAIL sert de référence.

Soit un milieu turbide (Fig. I.8) de hauteur ΔZ, de coefficient d'extinction $k(\Omega)$ et de LAD sphérique (*i.e.*, $k(\Omega)=k$, car $G(\Omega)=0.5\ \forall\Omega$), représenté par une couche homogène avec SAIL et une couche de cellules juxtaposées identiques (LAI_c=cste) avec DART. Cette différence de représentation induit des expressions différentes du rayonnement d'ordre 1 diffusé selon la verticale :

- SAIL : $W_{1,SAIL} = W_o.P(\Psi_{sv}).G(\Omega_s).u_f.\int_0^{\Delta Z} \exp[-k.(1+\frac{1}{\mu_s}).z].\frac{dz}{\mu_s} = W_o.P(\Psi_{sv}).\frac{1}{1+\mu_s}.\{1-\exp[-k.(1+\frac{1}{\mu_s}).\Delta Z]\}$

où W_o est le flux incident sur la couche, $P(\Psi_{sv})$ est la fonction de phase et u_f est la densité volumique foliaire ($k=0.5.u_f$). Le flux W_{SAIL} est égal au flux $W_{int} = W_o.[1-\exp(-\frac{k.\Delta Z}{\mu_s})]$ diffusé

et transmis selon la verticale à partir d'un point de profondeur Δh de la couche : $W_{1,SAIL} = W_{int}.P(\Psi_{sv}).e^{-k.\Delta h}$

$$\Rightarrow [1 - \exp(-\frac{k.\Delta Z}{\mu_s})].e^{-k.\Delta h} = \frac{1}{1+\mu_s}.\{1 - \exp[-k.(1+\frac{1}{\mu_s}).\Delta Z]\}$$

$$\Rightarrow \Delta h = -\frac{1}{k}.\ln\{\frac{1}{1+\mu_s}.\frac{1 - \exp[-k.(1+\frac{1}{\mu_s}).\Delta Z]}{1 - \exp(-\frac{k.\Delta Z}{\mu_s})}\}$$

Le développement limité au second ordre de Δh selon k donne $\Delta h \approx \frac{\Delta Z}{2}.[1 - \frac{LAI_c}{12.\mu_s}.(\mu_s+2)]$, ce qui permet de vérifier que $\Delta h \rightarrow \frac{\Delta Z}{2}$ si $LAI_c \rightarrow 0$, sachant que $LAI_c = k.\Delta Z$.

- DART : $W_{1,DART} = W_1.e^{-k.\Delta h_1} + W_2.e^{-k.\Delta h_2}$ avec $\theta_s \in [18.4°\ \ 45°]$

W_1 et W_2 sont les flux diffusés selon la verticale, à partir des points milieux M_1 et M_2. Deux rayons sont incidents sur les cellules supérieures de la maquette si $\theta_s \in [Atan(1/3)\ \ 45°]$. Pour $\theta_s > 45°$, le nombre de rayons incidents sur les cellules du haut est supérieur à 2. Pour des angles inférieurs à $\theta_s = 18.4°$, le fait d'avoir plusieurs rayons incidents n'apparaît pas pour les cellules du haut mais pour les cellules de certaines couches plus basses. M_1 et M_2 se trouvent le long des trajets des rayons (1) et (2), de longueurs $\Delta l_1 = \frac{\Delta Z}{2}.[\frac{1}{\sin\theta_s} - \frac{1}{\cos\theta_s}]$ et $\Delta l_2 = \frac{\Delta Z}{\mu_s} - \Delta l_1$.

$$W_1 = W_o.[1 - e^{-k.\Delta l_1}].P(\Psi_{sv}) \qquad W_2 = W_o.e^{-k.\Delta l_1}.[1 - e^{-k.\Delta l_2}].P(\Psi_{sv})$$

Δh_1 et Δh_2 sont les longueurs des trajets pour sortir de la cellule à partir des points milieux :

$$\Delta h_1 = \mu_s.\frac{\ln 2 - \ln[1+\exp(-k.\Delta l_1)]}{k} \qquad \Delta h_2 = \mu_s.\frac{\ln 2 - \ln[1+\exp(-k.\Delta l_2)]}{k} + \Delta l_1.\mu_s$$

Il s'agit donc d'évaluer le rapport : $\gamma = \frac{W_{1,SAIL}}{W_{1,DART}} = \frac{[1 - \exp(-\frac{k.\Delta Z}{\mu_s})].e^{-k.\Delta h}}{[1 - e^{-k.\Delta l_1}].e^{-k.\Delta h_1} + e^{-k.\Delta l_1}.[1 - e^{-k.\Delta l_2}].e^{-k.\Delta h_2}}$

- Forts LAI_c : $\Delta h_1 \rightarrow \frac{\Delta Z.\mu_s}{LAI_c}.\ln(2)$, $\Delta h \rightarrow \frac{\Delta Z}{LAI_c}.\ln(1+\mu_s)$, $W_1 \approx W_{int}$ et $\gamma \rightarrow \frac{2^{\mu_s}}{1+\mu_s} \in [0.94\ \ 1]\ \ \forall\theta_s$

- Faibles LAI_c : $\gamma \approx 1 - \frac{LAI_c}{4}.[\frac{4.\sin\theta_s.\mu_s - 3.\sin^2\theta_s - \mu_s^2}{\mu_s.\sin^2\theta_s}] < 1$. Plus petit γ pour $\theta_s \approx 27° \Rightarrow \gamma \approx 1 - 0.28.LAI_c$

Un raisonnement similaire montre que pour $\theta_s > 18.4°$, on a :

$$LAI_c<<1 \Rightarrow \Delta h_1 = \mu_s.\frac{\ln 2 - \ln[1+\exp(-k.\Delta Z/\mu_s)]}{k} \rightarrow \frac{\Delta Z}{2}.[1-\frac{LAI_c}{4.\mu_s}] < \Delta h, \text{ soit } \gamma \approx 1-\frac{LAI_c^2}{24.\mu_s}.(1-\mu_s)$$

En fait, le rapport γ indique une limite supérieure des écarts entre $W_{1,SAIL}$ et $W_{1,DART}$, du moins pour les LAI_c faibles, en raison d'effets de compensation dus à la contribution de plusieurs couches superposées et aux diffusions multiples. L'évolution de γ avec LAI_c permet cependant d'expliquer pourquoi les réflectances DART sont généralement supérieures aux réflectances SAIL. Pour des milieux turbides, la différence ($W_{1,DART}$ - $W_{1,SAIL}$) augmente avec l'augmentation de LAI_c. Elle tend vers une limite supérieure pour $LAI_c>>1$. Cette tendance est bien vérifiée avec les simulations (Tab. I.5). Ainsi, la différence ($W_{1,DART}$ - $W_{1,SAIL}$) croît pour des LAI_c faibles et varie peu autour de LAI_c intermédiaires. Dans le cas de directions d'observation obliques le LAI apparent du couvert augmente avec l'angle zénithal d'observation (θ_v), si bien que l'écart entre les modèles DART et SAIL tend à augmenter avec θ_v. Cependant, pour les forts angles θ_v, le LAI apparent peut devenir suffisamment important pour que l'écart entre DART et SAIL n'augmente plus. Il peut même diminuer, car le mode de diffusion du rayonnement par le modèle DART implique une surestimation de l'atténuation par les cellules voisines pour les grands angles zénithaux d'observation (Fig. I.7). Tous les effets indiqués ci-dessus sont bien évidemment dépendants du LAD.

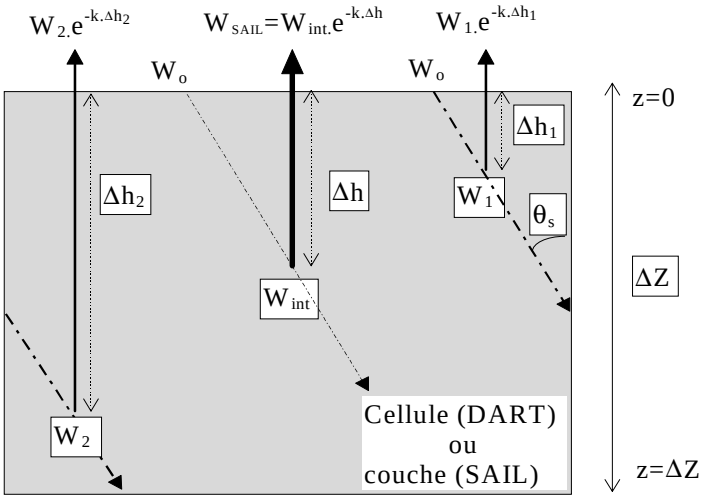


Figure I.8 : Diffusion d'une couche plane turbide avec SAIL (W) et DART (W_1, W_2).

Le tableau I.5 indique l'erreur absolue moyenne commise entre les simulations DART et SAIL pour des directions dans le demi hémisphère avant, avec $\theta_v<50°$ et un LAI par cellule (LAI_c) de 0.16 à 0.8. Deux LAD foliaires (planophile, sphérique) sont considérés. Les réflectances SAIL au nadir servent de référence (Tab. I.3). LAI_c, *i.e.* le LAI par cellule, exerce une forte influence sur la précision des résultats : plus LAI_c est important et plus les erreurs sont importantes.

Quand LAI_c augmente 0.16 à 0.8, *i.e.* la maille d'échantillonnage varie de 10cm à 90cm, l'erreur relative augmente d'environ 1% à 5% dans le visible et de 0.3% à 2.5% dans le proche infrarouge. Ces erreurs dues au mode d'échantillonnage du paysage représentent des limites supérieures. Ainsi, leurs valeurs relatives diminuent en présence d'un sol de réflectance non nulle, compte tenu du fait que la précision concernant le flux diffusé par le sol et transmis par un couvert turbide ne dépend pas de la maille d'échantillonnage. En effet, l'addition d'un terme "exact" à la réflectance du couvert rend plus faible l'erreur relative due à la maille d'échantillonnage. De même, les effets directionnels induits par la structure de couverts hétérogènes tels que les forêts est transmise sont suffisamment importants (Kimes et Sellers, 1985) pour masquer des erreurs dues à la maille d'échantillonnage.

	Erreur ε (DART *vs.* SAIL)			
	LAD sphérique		LAD planophile	
LAI_c (Δx)	VIS	PIR	VIS	PIR
0.16 (10cm)	$3.6.10^{-4}$	1.10^{-3}	$3.46.10^{-4}$	$1.18.10^{-3}$
0.24 (20cm)	$8.7.10^{-4}$	$1.41.10^{-3}$	$8.8.10^{-4}$	$1.26.10^{-3}$
0.33 (30cm)	9.10^{-4}	$1.64.10^{-3}$	$1.3.10^{-3}$	$4.69.10^{-3}$
0.40 (40cm)	$9.5.10^{-4}$	$3.16.10^{-3}$	$1.8.10^{-3}$	$5.47.10^{-3}$
0.50 (50cm)	10^{-3}	$3.31.10^{-3}$	$1.87.10^{-3}$	$6.4.10^{-3}$
0.57 (60cm)	$1.04.10^{-3}$	5.10^{-3}	$2.5.10^{-3}$	$7.4.10^{-3}$
0.67 (70cm)	$1.14.10^{-3}$	$6.16.10^{-3}$	$2.58.10^{-3}$	$9.32.10^{-3}$
0.70 (80cm)	$1.18.10^{-3}$	8.10^{-3}	$2.64.10^{-3}$	$9.38.10^{-3}$
0.80 (90cm)	$1.18.10^{-3}$	8.10^{-3}	$2.66.10^{-3}$	$9.48.10^{-3}$

Tableau I.5 : FRD DART selon le LAI par cellule (LAI_c). La dimension (Δx) des cellules est indiquée entre parenthèses. Le LAI de la maquette est 4 et la densité volumique foliaire est $0.016m^{-1}$. LAD sphérique et planophile.

Ces résultats mettent en évidence une limitation de l'approche qui combine la discrétisation de l'espace et des directions de propagation : une surestimation de la réflectance, compte tenu de l'impossibilité de représenter de manière exacte la distribution réelle des trajets des rayons incidents à l'intérieur des cellules de la maquette. D'autre part, l'approche analytique indique que le choix des points milieux dans le modèle DART n'est pas optimal pour simuler la réflectance du couvert. Il oblige en effet de considérer des LAI_c suffisamment faibles pour minimiser les

erreurs dans le cas de milieux turbides. Le choix des points milieux est en fait un bon compromis entre la simulation des réflectances et du bilan radiatif (*e.g.*, APAR 3-D) du couvert. De plus, le choix de cellules de faible LAI n'est pas une vraie contrainte, compte tenu de la faible erreur généralement commise (Tab. I.5) et de la nécessité d'utiliser de petites cellules, *i.e.* petits LAI_c, d'échantillonnage pour bien échantillonner la structure du couvert.

Temps	Taille des cellules (cm)	Nb cellules pleines
33h46'48"	10cm	127500
2h	20cm	16250
24'36"	30cm	5202
6'	40cm	1872
3'	50cm	1100
58"	60cm	576
45"	70cm	392
25"	90cm	252

Tableau I.6 : Temps de calcul de simulations DART (3 itérations) selon le nombre de cellules non vides de la maquette. LAI=4. u_f=0.016m^{-1}. LAD planophile.

Toute simulation réalisée avec le modèle DART requiert donc le choix d'une maille d'échantillonnage. Un choix de maille d'échantillonnage trop grossier implique des erreurs de simulation, alors qu'un choix de maille d'échantillonnage trop petit implique des temps de calcul inutilement trop importants. Le temps de calcul est en effet directement lié au nombre de cellules non vides présentes dans la maquette. Ainsi, le tableau I.6 indique que lorsque le nombre de cellules foliaires dans la maquette augmente de 252 à 127500, le temps de calcul augmente de 25s à 33h46'48", avec une station de travail IBM Risc 6000. Il s'avère que le temps de calcul (t) suit la loi :

$$t = 0.0113.N^{1.3757} \quad (r^2=0.999)$$

Le temps de calcul évolue donc plus rapidement que le nombre N de cellules de la maquette. Pour la suite de mes travaux, notamment ceux concernant les études sur les hêtraies de Fontainebleau, j'ai en général utilisé des cellules de densité foliaire inférieure ou égale à 0.3, de manière à obtenir des erreurs relatives sur le FRD systématiquement inférieures à 1%.

IV.4 Rayonnements total et diffusé par le mésophylle foliaire

Le modèle DART offre la particularité de distinguer le rayonnement $W_{df}(\Omega)$, diffusé au moins une fois par le mésophylle des feuilles, du rayonnement $W_{nf}(\Omega)$ qui n'a jamais été diffusé par le mésophylle foliaire. Le flux $W_{nf}(\Omega)$ a deux origines principales : le sol et la réflexion spéculaire foliaire. Sachant que seul le flux $W_{df}(\Omega)$ contient une information sur la biochimie foliaire, les conditions optimales pour étudier la biochimie foliaire impliquent que le rapport "$W_{df}(\Omega)/(W_{df}(\Omega)+W_{nf}(\Omega))$" soit maximal. Les résultats présentés dans ce paragraphe ont pour objectif d'illustrer cette distinction avec un cas particulier schématique. Le rôle de la réflexion spéculaire foliaire sur la réflectance du couvert est tout d'abord analysé.

IV.4.1 Influence de la réflectance spéculaire foliaire

Le tableau I.7 illustre l'influence des mécanismes spéculaires foliaires sur la réflectance et l'albédo visible et proche infrarouge d'un couvert, pour trois angles zénithaux solaires (0°, 30°, 60°). Le couvert est supposé être un milieu homogène avec un LAI égal à 4, au dessus d'un sol de réflectance nulle ($\rho_{sol}=0$), et de LAD foliaire sphérique, planophile, ou érectophile. L'analyse est conduite en considérant deux situations schématiques : feuilles uniquement lambertiennes et feuilles lambertiennes et spéculaires. Les propriétés optiques correspondantes sont $\rho_f=\tau_f=0.1$ dans le visible, et $\rho_f=\tau_f=0.45$ dans le proche infrarouge. La réflectance spéculaire a été simulée en utilisant un coefficient de rugosité K=0.3. L'influence du LAD et de l'angle solaire zénithal sur la réflectance et l'albédo du couvert dans les deux situations, *i.e.* "lambertien" puis "lambertien + spéculaire", est examinée ci-dessous.

- Cas "lambertien"

  - *influence du LAD*. La réflectance et l'albédo du couvert dans les domaines du visible et du proche infrarouge sont d'autant plus importants que la section efficace d'interception du feuillage est forte selon les directions d'éclairement et d'observation. En effet, en première approximation, c'est-à-dire en ne considérant que les diffusions d'ordre 1, la réflectance du milieu, due à une élément de volume, est proportionnelle au produit de l'intégrale $\sigma(\Omega_s,\Omega_v)$ du produit $\sigma(\Omega_f,\Omega_s,\Omega_v)$ des sections efficaces foliaires pondérées par la proportion $\frac{g(\Omega_f)}{2\pi}$ de surface foliaire, et d'un terme exponentiel fonction du LAI et des cosinus directeurs des directions Ω_s et Ω_v. Ainsi, pour un soleil à la verticale, les plus fortes réflectances au nadir

sont obtenues avec un LAD planophile, et les plus faibles valeurs avec un LAD érectophile. Ces différences entre réflectances diminuent beaucoup si l'angle zénithal solaire augmente, car alors $\sigma(\Omega_s,\theta_v=0)$ diminue pour les LAD sphérique et planophile et augmente pour le LAD érectophile. Le LAD influence différemment l'albédo. En effet, celui-ci dépend de l'intégrale $\sigma(\Omega_s)$ des $\sigma(\Omega_s,\Omega_v)$ sur $\Omega_v \in 2\pi$. Ainsi, dans le proche infrarouge avec $\theta_s=60°$, le LAD érectophile conduit à un albédo maximal. Par contre dans le visible, un LAD érectophile donne lieu à un albédo légèrement maximum pour les feuilles "lambertiennes" et minimal pour les feuilles "lambertiennes et spéculaires". Ce comportement particulier pour le spéculaire est dû au fait qu'avec $\theta_s=60°$, la proportion de feuilles qui donnent lieu à une réflectance spéculaire au nadir est très faible si le LAD est érectophile, contrairement au cas de LAD sphérique et planophile.

- *influence de l'angle zénithal solaire*. L'augmentation de l'angle zénithal solaire implique que la partie la plus éclairée du couvert, c'est à dire celle qui contribue le plus à l'albédo et à la réflectance, se situe à des hauteurs de plus en plus élevées dans le couvert, ce qui tend à augmenter la réflectance et l'albédo du couvert. D'autre part, quand θ_s augmente $\sigma(\Omega_s)$ croît si le LAD est érectophile, reste constant si le LAD est sphérique et décroît si le LAD est planophile. Il en résulte que l'albédo augmente systématiquement avec θ_s, pour tout LAD, avec une faible augmentation pour le LAD planophile. Le comportement de la réflectance au nadir est différent, car il dépend de $\sigma(\Omega_s,\theta_v=0)$ et non de $\sigma(\Omega_s)$. Ainsi, pour tout LAD, la réflectance visible ρ_{VIS} diminue nettement quand θ_s passe de 0° à 30° puis augmente quand θ_s passe de 30° à 60°. Cette augmentation est forte pour le LAD érectophile, car alors $\sigma(\Omega_s,\theta_v=0)$ augmente beaucoup quand θ_s passe de 30° à 60°. De même, pour les LAD sphérique et planophile, la réflectance proche infrarouge ρ_{NIR} décroît quand θ_s passe de 0° à 30° et augmente quand θ_s passe de 30° à 60°. Pour le LAD érectophile, ρ_{NIR} augmente régulièrement et fortement quand θ_s croît de 0° à 60°.

	R_{DART} - θ_v=0° - θ_s=0°		R_{DART} - θ_v=0° - θ_s=30°		R_{DART} - θ_v=0° - θ_s=60°	
LAD	Lambertien	Lamb. + spéc.	Lambertien	Lamb. + spéc.	Lambertien	Lamb. + spéc.
Sphérique	0.0619/0.457	0.063/0.479	0.0355/0.346	0.037/0.365	0.0364/0.368	0.038/0.392
Albédo	0.037/0.356	0.038/0.367	0.042/0.384	0.043/0.396	0.059/0.501	0.062/0.516
Planophile	0.091/0.636	0.13/0.7	0.0495/0.45	0.053/0.465	0.0504/0.456	0.053/0.466

Albédo	0.053/0.459	0.056/0.485	0.054/0.461	0.058/0.485	0.058/0.483	0.068/0.514
Erectophile	0.0165/0.149	0.017/0.153	0.0141/0.171	0.147/0.183	0.0176/0.21	0.019/0.226
Albédo	0.017/0.184	0.017/0.191	0.031/0.313	0.031/0.323	0.06/0.523	0.061/0.536

Tableau I.7 : Albédo et réflectances DART VIS et PIR au nadir. Milieux avec feuilles "lambertiennes" (VIS : $\rho_f=\tau_f=0.1$. PIR : $\rho_f=\tau_f=0.45$) et feuilles "lambertiennes et spéculaires" (VIS : $\rho_f=\tau_f=0.1$. PIR : $\rho_f=\tau_f=0.45$; K=0.3). Trois directions solaires : $\theta_s=0°$, 30°, 60°. $\rho_{sol}=0$.

- Cas "lambertien + spéculaire"

L'ajout de la réflectance spéculaire foliaire à la réflectance lambertienne foliaire (Tab. I.7) augmente bien évidemment la réflectance et l'albédo du couvert dans tout domaine spectral. La valeur de cette augmentation dépend du LAD et de l'angle zénithal solaire. En effet, en première approximation, c'est à dire en considérant uniquement les diffusions d'ordre 1, la contribution des réflectances spéculaires foliaires à la réflectance du couvert est d'autant plus élevée que l'angle de phase (Ψ_{sv}) entre la direction solaire et la direction d'observation est important et que la proportion de surface foliaire associée à cet angle de phase est élevée.

- *LAD sphérique*. La proportion de surface foliaire efficace est une constante pour les directions d'éclairement et d'observation. L'angle solaire, par le biais de l'angle de phase, est alors le paramètre prédominent pour expliquer la contribution du spéculaire sur la réflectance du couvert au nadir. Cette contribution augmente avec l'angle zénithal solaire, comme l'angle de phase (Ψ_{sv}). L'augmentation relative de la réflectance du couvert est plus forte dans le proche infrarouge ($\Delta\rho_{PIR}/\rho_{PIR}$=+5.5% pour $\theta_s=0°$ et +6.5% pour $\theta_s=60°$) que dans le visible ($\Delta\rho_{VIS}/\rho_{VIS}$=+2% pour $\theta_s=0°$ et +4% pour $\theta_s=60°$), contrairement à ce qui est observé pour une feuille. La plus forte augmentation relative de ρ_{PIR} est expliquée par l'effet combiné des diffusions multiples et de la forte réflectance foliaire lambertienne dans le proche infrarouge. Cette tendance est mise en évidence avec le cas schématique d'un couvert foliaire de LAI infini. En première approximation, la réflectance du couvert, $\rho\approx\frac{1-\sqrt{1-\omega_f}}{1+\sqrt{1-\omega_f}}$, est telle que le rapport $\frac{\Delta\rho}{\rho}/\frac{\Delta\omega_f}{\omega_f}$ augmente si l'albédo foliaire ω_f augmente, c'est à dire quand on passe du visible au proche infrarouge. Ainsi, pour $\omega_f<<1$, $\rho\approx\frac{\omega_f}{4-\omega_f}$ si bien qu'une augmentation $\Delta\omega_f$ implique que $\Delta\rho\approx\frac{4.\Delta\omega_f}{(4-\omega_f)^2}$, soit $\frac{\Delta\rho}{\rho}\approx\frac{\Delta\omega_f}{\omega_f}.\frac{4}{4-\omega_f}$.

- *LAD planophile*. Dans le visible et le proche infrarouge, l'apport de la diffusion foliaire spéculaire sur la réflectance du couvert au nadir survient surtout quand la direction solaire est verticale, c'est à dire quand les directions d'éclairement et de visée sont identiques. Cet apport diminue beaucoup quand θ_s augmente, car la proportion de surface foliaire donnant lieu à une diffusion spéculaire selon la direction verticale décroît alors beaucoup. Cette décroissance n'est donc pas compensée par l'augmentation de la réflectance spéculaire foliaire avec l'augmentation de l'angle de phase. Ainsi, la contribution relative du spéculaire dans le visible est +43% pour θ_s=0° et +6% pour θ_s=60°, alors que dans le proche infrarouge elle est +9.4% pour θ_s=0° et +2.2% pour θ_s=60°.
- *LAD érectophile*. La contribution relative du spéculaire croît si l'angle zénithal solaire augmente, du fait de l'augmentation de la surface foliaire donnant lieu à une diffusion spéculaire selon le nadir, et aussi, mais dans une moindre mesure, du fait de l'augmentation de la réflexion spéculaire foliaire due à l'augmentation de l'angle de phase. Ainsi, la contribution relative du spéculaire dans le visible est +6.3% pour θ_s=0° et +12% pour θ_s=60°, alors que pour ρ_{PIR} elle est +2.7% pour θ_s=0° et +13% pour θ_s=60°.

Les résultats précédents soulignent l'importance de la prise en compte des effets spéculaires, au moins pour certaines configurations du LAD et des directions d'éclairement solaire et d'observation. Il convient de remarquer que la contribution "spéculaire" ajoutée à la contribution purement "lambertienne" comprend du rayonnement qui a été diffusé au moins une fois de manière spéculaire et qui peut avoir été diffusé une ou plusieurs fois de manière lambertienne par le mésophylle foliaire. La contribution dite "spéculaire" peut donc par le biais de diffusions multiples contenir une information sur la composition biochimique foliaire. Cet aspect est étudié ci-dessous.

IV.4.2 Rayonnement diffusé par le mésophylle foliaire

Le rayonnement diffusé au moins une fois par le mésophylle foliaire a été étudié avec un milieu homogène foliaire de LAI compris entre 1 et 4, pour les LAD planophile, sphérique et érectophile. La réflectance du sol a été fixée à 15%. Seul le cas d'un éclairement avec un angle zénithal solaire θ_s=30° dans le domaine du visible (ρ_f=τ_f=0.1), en raison de l'importance de ce domaine pour l'étude de la concentration foliaire en chlorophylle, est présenté ici.

La figure I.9 indique les réflectances visible directionnelles associées au rayonnement total (R_t), diffusé au moins une fois par le mésophylle d'une feuille (R_{df}) et jamais diffusé par le mésophylle d'une feuille (R_{nf}). Le terme R_{nf} dépend essentiellement du sol, pour les faibles LAI, et essentiellement de la réflectance spéculaire foliaire, pour les forts LAI. La contribution de la réflectance spéculaire foliaire est d'autant plus importante que la direction d'observation est telle que la proportion de feuilles qui vérifient la condition de spécularité est importante. R_{nf} et R_{df} présentent systématiquement un maximum local selon la direction du hot spot pour tout LAD et pour tout LAI. Pour R_{nf}, ce maximum est essentiellement dû à une plus grande influence du sol sur la réflectance du couvert, en raison du maximal local de la transmittance $T_{couvert}(\Omega_s).T_{couvert}(\Omega_v) = \exp[-\frac{G(\Omega_s)}{\mu_s}]$, quand $\theta_v=\theta_s$. En effet, dans cette configuration, la réflectance spéculaire foliaire est minimale, ce qui se traduit donc par une contribution spéculaire foliaire minimale si le LAD ne présente pas de maximum local. Le maximum de R_{df} pour $\theta_v=\theta_s$ est dû à une meilleure transmission "$T_{couvert}(\Omega_s).T_{couvert}(\Omega_v)$" du rayonnement issu des diffusions volumiques foliaires d'ordre 1 associées au rayonnement solaire direct.

Avec un LAD sphérique et érectophile, la surface foliaire efficace apparente croît si l'angle zénithal d'observation θ_v augmente. Un plus grand θ_v implique donc que R_{df} augmente et que R_{nf} diminue avec la diminution de l'influence du sol. Cette tendance est très marquée pour le LAD érectophile. Ainsi, avec un LAD érectophile, la faible valeur de $\sigma(\Omega_s,\theta_v=0)$ pour $\theta_s=0°$ explique la forte valeur de R_{nf} et la faible valeur de R_{df}. Un LAD planophile implique deux comportements particuliers. (1) R_{nf} a un large maximum centré sur la direction dite "spéculaire" ($\theta_v=\theta_s$). La largeur de ce maximum est directement liée à la largeur du LAD autour de la direction verticale des normales foliaires. (2) Quand θ_v croît, R_{df} est presque constant, car la section efficace foliaire du couvert ne varie pas, alors que R_{nf} croît un peu, car la réflectance spéculaire foliaire augmente un peu alors que l'influence du sol reste constante.

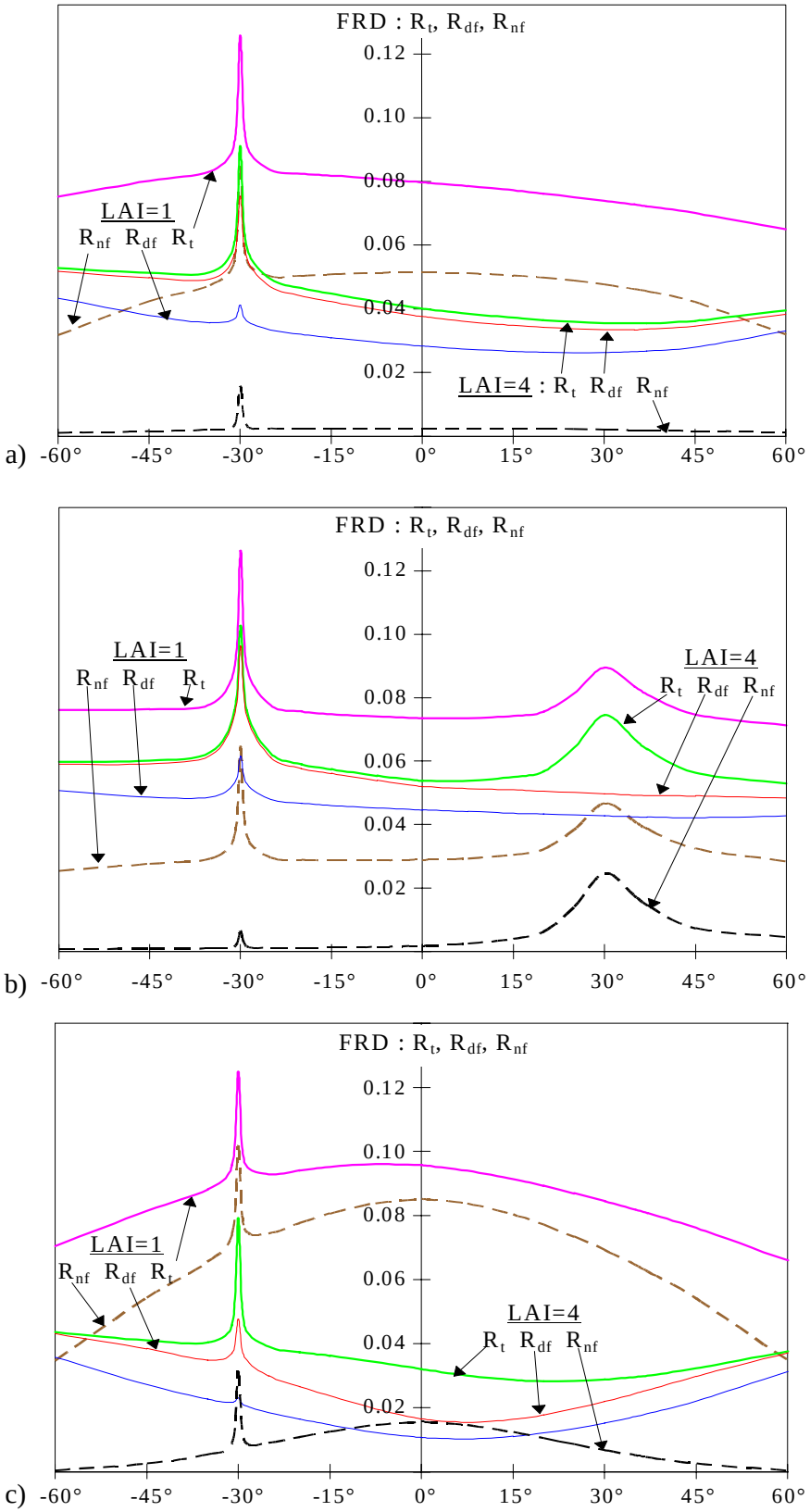


Figure I.9 : Réflectances directionnelles associées au rayonnement total (R_t), diffusé au moins une fois par le mésophylle d'une feuille (R_{df}) et jamais diffusé par le mésophylle d'une feuille (R_{nf}). Visible (ρ_f=τ_f=0.1). Milieu homogène. LAI=4. LAD sphérique (a), planophile (b) et érectophile (c). ρ_{sol}=15%.

Le rapport (R_{df}/R_t) est systématiquement faible pour tous les LAD et toutes les directions d'observation si le LAI est faible (LAI=1). Par contre, si le LAI est élevé, (R_{df}/R_t) prend des valeurs élevées pour toutes les directions θ_v, excepté pour la direction du hot spot si le LAD est sphérique, et pour toutes les directions θ_v, à l'exception de la direction du hot spot et des directions centrées sur la direction spéculaire, si le LAD est planophile. Pour un LAD érectophile, (R_{df}/R_t) prend des valeurs élevées uniquement pour les grands angles θ_v ; *e.g.* ce rapport est supérieur à 3 si θ_v>30°.

IV.5 Test de validité du modèle DART

Cette section résume une étude à laquelle j'ai participé. Elle constitue à ce jour le principal travail réalisé pour valider le modèle DART ; une description complète est donnée dans la publication (Gastellu-Etchegorry *et al.,* 1997) jointe dans l'annexe 2. Elle a été conduite sur trois sites de forêts boréales du projet BOREAS (Sellers *et al.,* 1995) : old jack pine (OJP), old aspen (OA) et old black spruce (OBS). Ces sites ont été choisis en raison de la très bonne description du milieu (*e.g.*, densité et dimension des arbres, LAI, %C, propriétés optiques foliaires, etc.) et de la disponibilité de mesures de terrain et aéroportées du FRD du couvert. Ces dernières ont été respectivement acquises avec l'instrument PARABOLA (Deering *et al.,* 1995) et avec le capteur POLDER (Bréon *et al.*, 1997).

L'instrument PARABOLA (Portable Apparatus for Rapid Acquisitions of Land and Atmosphere) mesure le FRD de couverts dans le visible (666nm), proche infrarouge (825nm) et moyen infrarouge (1655nm). Le temps de mesure est très court (≈11s) avec un angle de vue instantané (IFOV) de 15°. Son installation sur un câble entre 2 pylônes à 14m au-dessus du couvert arboré a conduit au calcul du FRD moyen de 11 FRD mesurés tous les 2m le long du câble. L'utilisation du FRD moyen et non d'une mesure unique a eu pour objectif de minimiser un défaut important des mesures PARABOLA : les valeurs du FRD selon différentes directions ne correspondent pas à la même surface au sol.

L'instrument POLDER (POLarisation Directionality of Earth's Surfaces) a mesuré le même jour que PARABOLA le FRD des sites OBS, OA et OJP à partir d'un avion C-130. Ce capteur est composé d'une matrice CCD (288x384 pixels avec un IFOV de 0.37°) et d'une roue porte- filtre qui opère dans le visible et le proche infrarouge. L'angle de vue total est ±43° selon la trace du

vecteur et ±51° selon la direction perpendiculaire à cette trace. La dimension des pixels est 35mx35m, compte tenu de l'altitude (5,500m) de l'avion. Les procédures de correction géométriques, nécessaires pour rendre superposables les images acquises selon différents axes de vol, ont conduit à une dimension des pixels égale à 175mx175m. Les données POLDER utilisées dans cette étude nous ont été fournies déjà corrigées des effets atmosphériques (Bicheron *et al.*, 1997).

La figure I.10 présente deux FRD mesurés (PARABOLA et POLDER) et deux FRD simulés (DART et SAIL) du site OBS. Comme dans les sections précédentes, le modèle SAIL a été employé pour évaluer l'impact de l'architecture sur les FRD simulés. L'angle zénithal solaire est 36°. Des caractéristiques biophysiques et optiques identiques ont servi de paramètres d'entrée des modèles DART et SAIL. Elles sont indiquées dans l'annexe 2. Des simulations similaires ont été réalisées pour les sites OJP et OA.

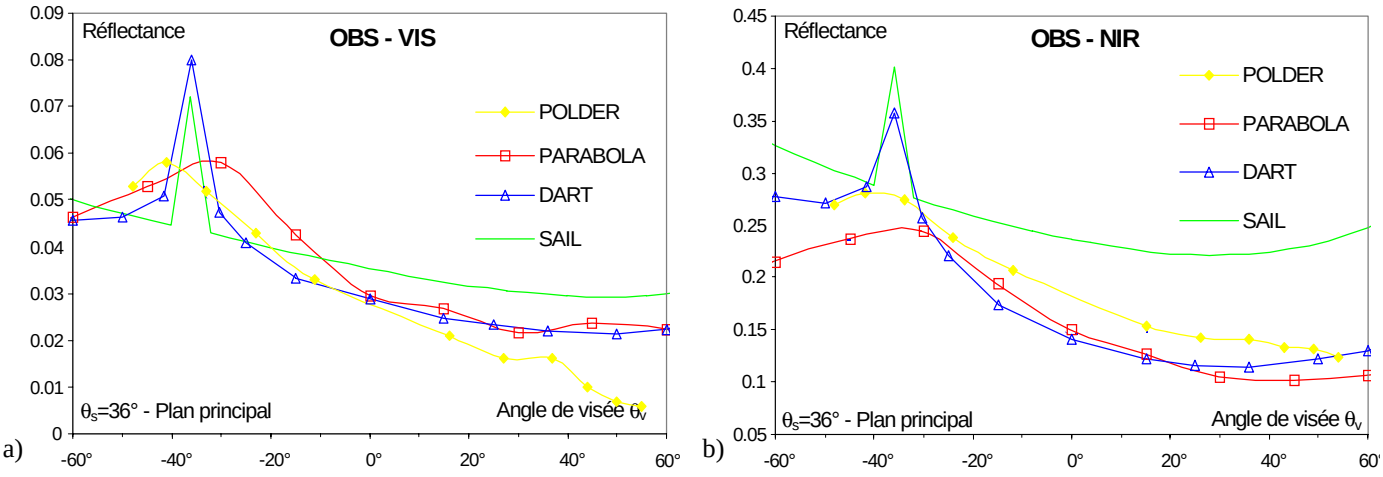


Figure I.10 : FRD DART, PARABOLA, POLDER et SAIL BRDF dans le plan principal du site OBS. Visible (a). Proche infrarouge (b). Les paramètres d'entrée des modèles SAIL et DART sont indiqués dans la table 2 de l'annexe 2.

Il apparaît que les FRD SAIL sont systématiquement très largement supérieurs aux FRD PARABOLA, POLDER et DART, alors que ces trois derniers FRD sont relativement plus proches. Ainsi, l'erreur relative entre les FRD SAIL et tous les autres FRD dépasse 30% dans le visible et 70% dans le proche infrarouge. La supériorité des FRD simulés par le modèle SAIL est aisément expliquée, car ce modèle néglige l'architecture du couvert, et par suite les effets d'ombre. Il est cependant intéressant de constater que cette surestimation du FRD SAIL peut

être plus ou moins masquée, en raison d'hypothèses simplificatrices dont l'effet est de sous estimer la réflectance du couvert. Ainsi, avec l'hypothèse d'un milieu foliaire homogène le modèle SAIL ne prend donc pas en compte la plus grande influence du sous bois sur la réflectance du couvert quand ce dernier devient ouvert, *i.e.* hétérogène. En effet, dans ce cas, le sous bois devient de plus en plus perceptible ce qui tend en général à augmenter la réflectance du couvert, car le sous bois a souvent une réflectance supérieure à celle des arbres. Il peut donc survenir des situations où plusieurs erreurs de signes opposés commises par un modèle turbide se compensent et conduisent à un résultat fortuitement correct pour certaines directions. Nous avons noté un tel effet pour le site OJP dans le visible. Cependant, pour tous les autres sites et toutes les autres configurations le modèle SAIL a systématiquement fourni des FRD beaucoup plus élevés que les FRD PARABOLA, POLDER et DART.

Quoique similaires les FRD PARABOLA, POLDER et DART présentent des différences notables. Ainsi, les écarts relatifs des FRD POLDER et PARABOLA diffèrent d'environ 25% dans le visible et le proche infrarouge. De plus, la réflectance POLDER décroît fortement dans le plan principal selon la direction avant, contrairement aux réflectances PARABOLA et aux réflectances simulées par les modèles DART et SAIL. Cette décroissance peut être due à une correction atmosphérique imparfaite des données POLDER. D'autre part, au niveau du hot spot les FRD POLDER et PARABOLA sont nettement plus faibles que les FRD DART. En effet, les capteurs PARABOLA et POLDER n'ont pas échantillonné exactement cette direction. L'important IFOV (15°) de PARABOLA explique que les réflectances mesurées pour des directions proches de la direction du hot spot soient très influencées par ce dernier, et soient donc localement fortes. Une étude théorique basée sur la simulation du FRD de parcelles de différentes dimensions (cf. Annexe 2) a mis en évidence une autre cause d'écart entre les FRD POLDER et PARABOLA. En effet, le FRD du couvert ne peut devenir stationnaire que pour des couverts suffisamment étendus. Le fait que les deux instruments n'observent pas la même surface au sol peut donc expliquer la différence observée entre les mesures du FRD du couvert.

Les FRD DART (Fig. I.10) ont des valeurs relativement proches des FRD PARABOLA. Ainsi, les écarts relatifs sont généralement inférieurs à 5%. Il est cependant important de noter le caractère trompeur de tels chiffres, en raison de l'incertitude sur les valeurs de référence, *i.e.* les réflectances mesurées, et de l'incertitude sur la mesure des paramètres biophysiques et optiques qui servent de paramètres d'entrée pour les modèles. Ainsi, lors de comparaisons entre FRD

mesurés et simulés, la notion d'erreur perd son sens si l'ordre de grandeur de l'incertitude des mesures est supérieur ou égal à celui de l'écart "mesures - simulations". Ainsi, les FRD SAIL surestiment suffisamment les FRD mesurés pour que l'on puisse affirmer que le modèle SAIL donne des résultats erronés. Lors de la comparaison de FRD mesurés et simulés, seuls les ordres de grandeur des écarts peuvent donc avoir un sens. Des chiffres précis n'ont en fait de signification facile à interpréter que pour des comparaisons entre modèles. L'inévitable imprécision des paramètres optiques et biophysiques mesurés sur le terrain complique aussi la comparaison "mesures - simulations". Ainsi, les mesures du LAI et des propriétés optiques foliaires des sites OBS, OA et OJP diffèrent souvent, et parfois notablement, entre les expérimentateurs. Par exemple, l'albédo foliaire associé au site OBS est compris entre 11% et 17% selon les expérimentateurs!!! Cet aspect est important car il induit une forte incertitude sur les FRD simulés, tout à fait indépendante de la précision des modèles. Ainsi, une erreur sur la mesure du LAI, par exemple 3 au lieu de 2, implique une diminution relative de la réflectance au nadir d'environ -20% dans le visible et -10% dans le PIR. D'autre part, une sous estimation de 1% sur l'albédo foliaire entraîne une sous estimation du FRD VIS simulé : près de 0.4% au nadir, 0.6% pour θ_v=36° et 0.85% pour θ_v=60°. L'importance de ces chiffres pose donc le problème de la validation des modèles de réflectance. Quelle valeur accorder aux résultats mentionnés dans la littérature, compte tenu de l'importante incertitude concernant les paramètres biophysiques et optiques qui servent de paramètres d'entrée au modèle?

Les remarques sur l'incertitude associée aux mesures aéroportées et de terrain ne doivent pas occulter le fait que nous avons pu bénéficier de jeux de données relativement exceptionnels. Ainsi, les instruments POLDER et PARABOLA sont uniques et extrêmement utiles pour toutes les études de télédétection où l'aspect directionnel est étudié ou utilisé. D'autre part, la qualité du jeu de mesures biophysiques et optiques des sites BOREAS est généralement considéré comme globalement supérieur aux jeux de données habituellement disponibles pour étudier la végétation avec l'aide de données de télédétection.

En résumé, ce travail a mis en évidence deux contraintes habituelles lors de travaux réalisés pour valider un modèle de transfert radiatif. (1) Les FRD mesurés, supposés servir de référence, ne sont pas exacts, car ils diffèrent notablement entre eux. (2) L'incertitude usuelle sur la mesure des paramètres biophysiques et optiques du couvert implique que les modèles doivent être utilisés de manière à fournir un intervalle de FRD et non un FRD unique. Les résultats obtenus

avec le modèle DART sont très encourageants, car l'emploi de paramètres biophysiques et optiques de la canopée et du sous bois réalistes, compte tenu des mesures de terrain, a conduit à des FRD qui encadrent de près les FRD mesurés. Ainsi, l'obtention de FRD SAIL proches des FRD mesurés de couverts arborés n'est généralement possible que pour un domaine angulaire limité et à condition d'utiliser un ou plusieurs paramètres d'entrée (LAI, %C, etc.) non vraisemblables. Le fait de pouvoir encadrer les FRD mesurés avec des FRD simulés en utilisant des propriétés optiques raisonnables n'est évidemment pas une validation. Ce résultat souligne cependant l'intérêt de modèles 3-D, comme DART, pour bien simuler les mesures de télédétection.

V. CONCLUSION PARTIELLE

Le modèle DART a été développé dans le but de simuler de manière précise le transfert radiatif dans des couverts hétérogènes tels que les milieux forestiers. Il peut en effet prendre en compte des paramètres tels que la densité et les dimensions des arbres. De plus, il permet de simuler tout type de configuration expérimentale, *e.g.*, topographie, rayonnement atmosphérique anisotrope, directions solaires et d'observation. La précision des sorties du modèle, *i.e.* FRD, images et bilan radiatif 3-D, est due au soin apporté pour modéliser les diffusions multiples. Ce modèle est donc à priori plus exact que la majorité des modèles actuellement disponibles :

- modèles turbides, qui supposent le milieu homogène.
- modèles géométriques, qui ne prennent que partiellement en compte les ombres entre arbres et nécessitent l'utilisation de réflectances connues à priori. Ces modèles sont en particulier mal adaptés au cas de forts angles zénithaux d'éclairement et d'observation.
- modèles analytiques semi-empiriques, qui tendent à être plutôt adaptés à des conditions expérimentales et milieux particuliers, et à la normalisation des réflectances.
- modèles de radiosité, qui nécessitent d'importantes hypothèses simplificatrices pour pouvoir traiter des milieux comportant un grand nombre d'éléments foliaires.

Un intérêt majeur du modèle DART est de pouvoir travailler avec des milieux et conditions expérimentales très variables. Ainsi, l'adaptation de la maille d'échantillonnage rend possible l'étude de paysages extrêmement complexes. De plus, la représentation des propriétés optiques avec des fonctions de phase permet d'utiliser des mesures expérimentales ou des sorties d'autres

modèles tels que le modèle optique foliaire PROSPECT (Jacquemoud, 1992). La souplesse du modèle DART a cependant une contrepartie qui a été mise en évidence dans les études schématiques présentées dans la deuxième partie de ce premier chapitre : les possibilités offertes par le modèle obligent l'opérateur à effectuer un certain nombre de choix. Ainsi, l'opérateur peut :

- représenter de manière plus ou moins précise le milieu étudié, avec une maille d'échantillonnage plus ou moins fine,
- simuler de manière plus ou moins exacte la propagation du rayonnement, avec un nombre plus ou moins important de directions discrètes,
- représenter de manière plus ou moins précise les propriétés optiques foliaires, avec des fonctions de phase associées aux diffusions de volume et de surface foliaire.

Différentes études déjà réalisées avec le modèle DART ont illustré sa souplesse d'utilisation dans le cas de plusieurs types d'applications : inversion de données satellitales (Estève *et al.*, 1997), étude de la texture de couverts (Pinel et Gastellu-Etchegorry, 1997), études de sensibilité de la réflectance à la structure du couvert (Gastellu-Etchegorry *et al.*, 1997), étude de la distribution 3-D du rayonnement absorbé dans un milieu forestier (Gastellu-Etchegorry et Trichon, 1997 ; Guillevic et Gastellu-Etchegorry, 1997), étude de la biochimie foliaire (Demarez *et al.*, 1997).

Les meilleures caractéristiques du modèle DART par rapport à la plupart des modèles de réflectance existants, sont obtenues au détriment d'une augmentation des temps de calcul et d'une plus grande complexité du jeu de paramètres d'entrée. En fait, le modèle DART peut fonctionner avec des jeux de paramètres très restreints ; *e.g.* avec les mêmes paramètres d'entrée que le modèle SAIL. Dans ce cas, il est cependant plus intéressant d'utiliser le modèle SAIL, car son temps de calcul est inférieur. Inversement, par rapport à certains modèles de lancer de rayons et de radiosité, le modèle DART nécessite des temps de calcul très inférieurs et surtout une description beaucoup moins précise du milieu. Cette moins bonne description du milieu peut rendre imprécis les FRD simulés. En fait, le modèle DART a été développé avec l'idée, à priori, que le mode de représentation du milieu, le mode de propagation du rayonnement et le mode de représentation des mécanismes d'interaction électromagnétique utilisés sont suffisants pour (1) la plupart des applications thématiques réalisées avec des données de télédétection

spatiale, et pour (2) de nombreuses applications qui utilisent la distribution 3-D du rayonnement dans le couvert.

La validité du modèle DART a été étudiée avec des données de terrain et aéroportées sur trois sites de forêts boréales. Aucune réponse définitive n'a pu être apportée en raison de deux difficultés classiques, indépendantes de la précision de DART :

- incertitude de la mesure des FRD du couvert,
- incertitude des paramètres biophysiques et optiques du couvert. Les modèles ne peuvent alors que fournir un intervalle de FRD et non un FRD unique.

Il convient donc d'être très prudent lors de travaux menés pour valider un modèle de réflectance. L'obtention de faibles erreurs entre FRD simulés et mesurés n'a de sens que si l'imprécision sur les paramètres biophysiques et optiques utilisés en entrée du modèle et qui influencent le FRD est très faible. Cette source d'incertitude des simulations est aussi extrêmement limitative pour les approches de validation basées sur l'étude de la précision des paramètres biophysiques et optiques obtenus par inversion de modèle de réflectance. Quelle valeur accorder à ces résultats, compte tenu des incertitudes à la fois sur les mesures de FRD et les paramètres biophysiques qui servent de référence ? Le succès des travaux de validation de modèles et de leur inversion mentionnés dans la littérature laisse souvent songeur, quand ils sont réalisés avec des paramètres tels que le LAI et la réflectance foliaire. Il est indéniablement trop souvent exagéré. Ces difficultés expliquent pourquoi l'inversion de modèles est appliquée à des paramètres, tels que le taux de couverture arboré (Estève *et al.*, 1997), plus faciles à mesurer sur le terrain que le LAI ou les propriétés optiques foliaires. En fait, un modèle, même non validé, peut être extrêmement utile. Par exemple, il peut renseigner sur l'évolution temporelle et la variation spatiale de paramètres biophysiques et/ou biochimiques, expliquer les mesures satellitales, fournir des bornes d'erreur sur les relations entre paramètres biophysiques et mesures satellitales, etc.

Le modèle DART n'a donc pu être validé comme nous l'aurions souhaité. Les résultats sont cependant très encourageants, car ils montrent que ce modèle peut simuler avec une bonne précision, pour toute direction solaire et de visée, le FRD de milieux forestiers, en utilisant comme paramètres d'entrée des paramètres biophysiques et optiques dont les valeurs sont

encadrées par des valeurs effectivement mesurées sur le terrain. Ceci n'est pas possible avec des modèles plus simples basés sur des approximations trop simplificatrices, comme le modèle turbide SAIL. Ce résultat souligne donc l'intérêt de modèles qui prennent en compte la nature 3-D des couverts forestiers. Par suite, ces modèles sont susceptibles d'être des outils efficaces et précis pour la détermination et analyse de relations entre les mesures de télédétection et les paramètres biophysiques et biochimiques des couverts. Cette possibilité est exploitée dans les deux chapitres suivants pour l'étude de la forêt tempérée de Fontainebleau.

CHAPITRE II

ETUDE DES PARAMÈTRES BIOPHYSIQUES DE LA FORÊT DE FONTAINEBLEAU PAR TÉLÉDÉTECTION ET MODÉLISATION

I INTRODUCTION

Le travail présenté dans ce chapitre est une évaluation empirique du potentiel de la télédétection spectrométrique visible (VIS) et proche infrarouge (PIR) pour estimer deux paramètres caractéristiques du fonctionnement d'une forêt : la chlorophylle et l'indice foliaire (LAI). Ce travail a été réalisé dans le cadre de la campagne EMAC (European Multisensors Airborne Campaign) organisée par l'agence spatiale européenne en 1994 sur la forêt de Fontainebleau. L'objectif de cette campagne était de quantifier l'apport de mesures spatiales avec le spectromètre aéroporté ROSIS (Reflective Optics Spectrometric Imaging System) et le radar aéroporté E-SAR (European Synthetic Aperture Radar) pour étudier la dynamique saisonnière d'une forêt tempérée.

Dans un premier temps l'analyse de l'influence de la structure du couvert sur la réflectance a été mise en évidence par deux approches: une approche empirique basée sur la classification de l'image SPOT et une approche théorique s'appuyant sur des simulations conduites avec le modèle DART.

L'étude multi-temporelle de la forêt de Fontainebleau s'est avérée impossible, car le capteur ROSIS a survolé le site à deux reprises uniquement, aux mois de mai et de juillet 1994. Les relations empiriques entre les mesures ROSIS et de terrain (LAI et chlorophylle) des parcelles survolées et échantillonnées ont été recherchées et analysées pour ces deux dates. La capacité prédictive de bandes spectrales uniques à été étudiée et comparée à celle des indices spectraux (NDVI, SR) calculés à partir de la combinaison de plusieurs bandes. Une part importante de ce travail a été centrée sur la détermination de la chlorophylle à partir de la position du point d'inflexion dans la zone du red edge entre les domaines spectraux du rouge et du proche infrarouge. L'apport des mesures à haute résolution spectrale a été analysé en comparant les relations obtenues avec les données du spectromètre ROSIS et du capteur à large bande SPOT acquises à la même date, *i.e.* en juillet.

Cette étude est centrée essentiellement sur l'analyse du comportement spectral des décidus. En effet, la chlorophylle n'a pas été mesurée pour les pins. De plus, le faible nombre de parcelles de pins à la fois échantillonnées et survolées (au maximum 9 pour SPOT) ne pouvait permettre l'obtention de résultats fiables.

II SITE D'ÉTUDE ET DONNÉES DISPONIBLES

II.1 Site d'étude

La zone d'étude est la Forêt de Fontainebleau, située au sud-est de Paris (48°25' de latitude nord et 2°40' de longitude est) à une altitude moyenne de 120m. La région est caractérisée par un climat tempéré avec une température moyenne annuelle de 10.2°C et un niveau de précipitation annuel moyen de 720mm réparti de façon régulière tout au long de l'année.

La forêt est gérée par l'Office National des Forêts (ONF). Elle est composée de décidus et de conifères couvrant une surface d'environ 17000 ha. Les essences dominantes sont le chêne (*Quercus petraea, Quercus pedonculata*), le hêtre (*Fagus sylvatica*), et le pin (*Pinus sylvestris*). Les espèces co-dominantes sont le charme (*Carpinus Betulus*) et le bouleau (*Betula pendula*). Les décidus sont plutôt situés sur une zone plane contrairement aux conifères (zones vallonnées).

Le domaine forestier est constitué par la juxtaposition de parcelles (20ha en moyenne) qui se différencient en particulier par l'espèce dominante, le mode de régénération et le stade de développement. Les parcelles sont soit monospécifiques, soit mixtes (chênes+hêtres, décidus+conifères, charmes en sous-étage). Quatre stades majeurs de développement sont distingués dans le cas d'une régénération artificielle (Lanier, 1986) :

- le fourré (Fo) : peuplement formé de tiges très nombreuses (diamètres des tiges ∅ <1cm) et ramifiées, de hauteurs inférieures à 3m. La densité peut varier de 5000 à 18000 tiges par ha.
- le gaulis (G, photo AII-1) : peuplement consécutif au fourré, formé de tiges encore flexibles (1cm< ∅ <5cm) avec des hauteurs comprises entre 3 et 6m. Il est caractérisé par une très forte densité d'arbres (≈ 2000 à 5000 arbres/ha). Le diamètre moyen des houppiers est inférieur à 1m.
- le perchis (P, photo AII-2) : stade de développement consécutif au gaulis avec une densité d'arbres plus faible que ce dernier (≈ 700 à 5000 arbres/ha). Il est formé de tiges rigides tendant à s'individualiser avec des hauteurs supérieures à 6m et des diamètres de houppiers inférieurs à 2m en moyenne. Comme pour les gaulis, la hauteur des arbres d'une même parcelle varie peu et

  le taux de couverture avoisine souvent les 80-100%. La canopée est donc qualifiée d'homogène.
- la futaie (Fu, photo AII-3) : stade ultime de développement succédant au perchis. Le taux de couverture est voisin de celui des perchis mais avec des densités d'arbres beaucoup plus faibles,

en général comprises entre 400 et 1000 arbres par hectare. Les arbres sont bien individualisés et les houppiers s'étalent. Leurs diamètres peuvent dépasser la dizaine de mètres. La canopée présente également d'importantes variations de hauteur (10 à 15m).

Certaines parcelles correspondent à un mode de régénération naturelle. Ce sont des parcelles en coupe d'ensemencement, appelées semenciers (S) (photo AII.1 à 4). Ces derniers sont des peuplements très ouverts constitués d'arbres adultes de faible densité (≈150 arbres/ha).

L'indice foliaire (LAI) des décidus présente une variation saisonnière marquée qui débute par un débourrement en avril et une chute des feuilles en novembre. La période de croissance dure environ six mois. Le LAI maximal est atteint quatre à six semaines après le débourrement. Il peut dépasser la valeur 8 (Annexe 4; Tab. A4.1 à A4.4).

II.2 Mesures de terrain

Dans le cadre de la campagne EMAC, le LEV (Laboratoire d'Ecophysiologie Végétale d'Orsay) a effectué, à plusieurs dates, des mesures de terrain sur 52 parcelles (Le Dantec, 1996). Un but majeur étant d'évaluer la possibilité de distinguer par télédétection les différents types de peuplements, les parcelles mesurées sur le terrain ont été choisies de manière à obtenir :

- des parcelles individuellement homogènes pour ce qui est des essences, de la topographie et de la structure du couvert (*e.g.* : hauteur et distribution spatiale des arbres).
- une bonne représentativité de l'ensemble du site, ce qui a conduit à sélectionner des parcelles présentant une variabilité maximale quant à l'âge, la hauteur, la biomasse, etc.

Les 52 parcelles ont été regroupées en 4 classes faisant référence à l'espèce dominante : 20 parcelles où le chêne est l'espèce dominante (C_i), 13 parcelles où le hêtre est dominant (H_i), 5 parcelles mixtes de chênes et hêtres (CH_i) et 14 pinèdes (P_i). La surface moyenne de ces parcelles avoisine 13ha.

De nombreux paramètres ont été mesurés tels que le LAI, la composition biochimique foliaire des différentes espèces (chlorophylle, lignine, azote), la densité d'arbres, le diamètre des troncs à 1.30 mètre de hauteur (DBH), etc. Les protocoles de mesure du LAI et de la concentration en chlorophylle foliaire sont résumés ci-dessous.

• Mesure de la concentration en chlorophylle

Les mesures de chlorophylle ont été effectuées sur les espèces décidues. Seules les feuilles de lumière (haut de la canopée) ont été analysées, car ce sont les feuilles qui influencent le plus la réflectance du couvert et donc les mesures de télédétection. L'échantillonnage a été réalisé sur 5 arbres de l'espèce dominante dans le cas de parcelles monospécifiques et sur 3 arbres par espèce, pour les parcelles mixtes. Sur chaque arbre, une branche a été recueillie dans le tiers supérieur du houppier au moyen d'un fusil, et 10 feuilles ont été prélevées sur chaque branche.

La concentration en chlorophylle foliaire des parcelles (Tab. II.1) à été estimée à l'aide du SPAD-502 de Minolta (Markwell *et al*, 1995)**.** Cet appareil calcule le rapport de la transmission des feuilles dans deux longueurs d'onde (650 et 940nm) pour lesquelles, l'absorption de la chlorophylle est respectivement forte et nulle. On effectue 6 à 10 mesures, réparties sur l'ensemble du limbe, afin de minimiser une éventuelle variabilité spatiale de concentration et/ou de la structure foliaire. La moyenne de ces mesures est directement réalisée par le SPAD. Cet instrument a été préalablement étalonné à l'aide de dosages classiques en laboratoire (extraction à l'acétone et mesures au spectrophotomètre). Cette étape préliminaire, réalisée au LEV par E. Dufrêne, S. Guimtrandry et J. Liebert, a permis d'établir une relation empirique qui exprime la concentration en chlorophylle totale foliaire (en µg/cm²) à partir d'une mesure SPAD:

$$Chl\ (\mu g/cm^2) = 47.341*SPAD/(70.362-SPAD) \qquad (r^2= 0.93, n=74)$$

• Mesures de PAI (Plant Area Index)

Le PAI des parcelles (Tab. II.1) a été déterminé sur le terrain par une méthode indirecte au moyen du LAI 2000 Li-Cor PCA (Li-Cor, 1991). Cet instrument estime selon 5 secteurs angulaires, la transmittance du couvert, *i.e.* le rapport du rayonnement au-dessus et en dessous du couvert végétal. La quantité biophysique dérivée, *i.e.* le PAI, est donc la surface projetée de l'ensemble des éléments constitutifs de la canopée, par unité de surface de sol. On a ainsi : PAI = LAI+WAI avec WAI (Wood Area Index), l'indice de bois associé aux éléments ligneux (branches essentiellement) et LAI, l'indice foliaire associé aux éléments foliaires de la canopée. Chez les espèces caducifoliées, le PAI est égal au WAI, avant la date de débourrement et il est proche du LAI au cours du maximum de la phase de végétation (Dufrêne et Bréda, 1995). En fonction de la taille de la parcelle, le PAI a été estimé à partir de 40 à 150 points de mesure espacés d'environ 10 mètres, selon plusieurs transects. Afin d'obtenir un échantillonnage représentatif du couvert, les transects ont été choisis de façon à traverser les parcelles selon au moins deux diagonales. La valeur du PAI

a ensuite été calculée à partir des données obtenues selon trois secteurs angulaires du LAI 2000, *i.e.* pour des angles zénithaux de 7°, 23° et 38° (Dufrêne et Bréda, 1995). Ainsi, compte tenu des chevauchements éventuels entre les transects, la surface échantillonnée est égale au minimum à 25% de la surface totale (cas des parcelles les plus grandes).

	10 Mai 1994	10 juillet 1994
Chlorophylle ($\mu g/cm^2$)	R: 10.56-33.09 m: 21.90 σ: 5.49	R: 45.20-86.98 m: 68.63 σ: 12.41
PAI	R: 1.05-7.63 m: 3.85 σ: 1.9	R: 1.18-8.28 m: 4.59 σ: 2.225

Tableau II.1: Dynamique (R), moyenne (m) et écart-type (σ) des concentrations en chlorophylle et PAI des sites tests survolés par le spectromètre ROSIS.

II.3 Données de télédétection

• Données ROSIS

Les travaux présentés dans ce chapitre ont été menés avec des mesures du spectromètre aéroporté ROSIS développé par le DLR (Institut d'Optoélectronique allemand) et l'Institut de Physique allemand (GKSS). Les caractéristiques spectrales et spatiales des données utilisées pour cette étude sont résumées dans le tableau II.2. Celles-ci ont été acquises le 10 mai et le 10 juillet 1994, à 10 km d'altitude, selon deux modes d'acquisition et pour deux directions d'observation (nadir et 20° avant). Le mode d'acquisition est soit spectral, avec 81 bandes spectrales contiguës et une résolution au sol de 16m, soit spatial avec 32 longueurs d'ondes non contiguës et une résolution au sol de 5.6m. Dans les deux modes, la résolution spectrale est égale à 12nm dans la région bleu/vert ([430-550nm]) et à 4nm dans la région rouge/proche infrarouge ([554-830nm]). Les images ROSIS ont été fournies avec des coefficients d'étalonnage ($W.m^{-2}.sr^{-1}.\lambda^{-1}$), après correction des déformations géométriques associées au déplacement et à l'orientation du capteur (roulis, tangage, lacet, ...). Les axes de vols sont orientés Est-Ouest (Fig. II.1). Les images couvrent une partie du sud de la forêt de Fontainebleau. Elles ont une longueur maximale de 18 km et une largeur de 2,5km.

• Image SPOT

L'image SPOT HRV multispectrale (vert: 500-590nm, rouge: 610-680nm et PIR: 790-890nm) acquise le 10 juillet 1994 au-dessus de la forêt de Fontainebleau, a aussi été analysée. L'objectif a



Figure II.1 : Images ROSIS et parcellaire de la forêt de Fontainebleau, gracieusement fourni par l'Office National des Forêts (ONF). Ces dernières se distinguent par leurs niveaux de gris. Les flèches (→) indiquent le sens des axes de vol.

1994	Mode	Échantillonnage Spectral	Δx	Trace sol	Nb parcelles	Coordonnées Début	Coordonnées Fin	φ_v
10 Mai θ_s=53°	Spectral Nadir (81 bandes)	430-550 nm :12nm 554-830 nm : 4nm	16 m	12 km	34	48°21'N/2°36'E	48°22'N/2°45E	83°
10 Juillet θ_s=30°	Spatial Nadir (32 bandes)	430-550 nm : 12nm 554-830 nm : 4nm	5.6m	18 km	24	48°21'N/2°33'E	48°22'N/2°48'E	83°
10 Juillet θ_s=30°	Spatial 20° avant (32 bandes)	430-550 nm : 12nm 554-830 nm : 4nm	5.6m	5.9 km	24	48°21'N/2°37'E	48°22'N/2°42'E	263°

Tableau II.2: Principales caractéristiques des images ROSIS : date et angle zénithal solaire (θ_s), mode d'acquisition et largeur des canaux spectraux (nm), taille du pixel (Δx), longueur de la trace (km), nombre de parcelles survolées, coordonnées géographiques (lat/long) et angle azimutal (φ_v : par rapport au Nord géographique) de chaque trace.

été de comparer l'apport des données SPOT à bandes larges et des données ROSIS à bandes étroites. La résolution au sol de 20m est comparable à celle des données ROSIS acquises en mode spectral. Les données SPOT (format 1B) ont été fournies par SPOT IMAGE déjà étalonnées et corrigées des déformations géométriques associées à la courbure et rotation de la Terre.

II.4 Traitements des données spatiales

• Corrections atmosphériques

Les réflectances ROSIS et SPOT (ρ^*) ont été corrigées des effets atmosphériques à l'aide de paramètres calculés avec le logiciel 6S (Vermote *et al*, 96) et de profils atmosphériques (température, vapeur d'eau et pression) fournis par la station météo de Trappes (Yvelines). La correction atmosphérique a été réalisée avec la relation :

$$\rho_c = \frac{\rho^* - T_g(\theta_s,\theta_v,z).\rho_a(z)}{T_g(\theta_s,\theta_v,z).T(\theta_s).T(\theta_v,z)+S(z).(\rho^*- T_g(\theta_s,\theta_v,z).\rho_a)}$$

$\rho_a(z)$: réflectance intrinsèque atmosphérique à l'altitude z de l'avion,

$S(z)$: albédo sphérique de l'atmosphère,

$T_g(\theta_s,\theta_v,z)$: transmittance atmosphérique selon les directions zénithales d'éclairement (θ_s) et d'observation (θ_v). Elle est associée à l'absorption gazeuse,

$T(\theta_s)$ et $T(\theta_v,z)$: transmittances de l'atmosphère pour le flux solaire incident selon la direction θ_s et le flux réfléchi par la terre jusqu'à l'altitude z selon la direction zénithale d'observation θ_v. Elles sont associées à la diffusion des gaz et des aérosols.

La figure II.2 montre les spectres des réflectances ROSIS de plusieurs parcelles: spectres (81 canaux) bruts et corrigés des effets atmosphériques acquis le 10 mai (Fig. II.a et b) et spectres (32 canaux) corrigés de juillet, au nadir (Fig. II.c) et à 20° (Fig. II.d). Un problème d'étalonnage du capteur ROSIS, non résolu par le DLR, explique l'obtention de réflectances corrigées (ρ_c) négatives dans le bleu [430-485nm].

• Intégration des données dans un Système d'Information Géographique (SIG)

Les données spatiales (ROSIS et SPOT) ainsi que les mesures terrain, ont été intégrées dans le SIG ILWIS. Ce dernier fonctionne sous Windows. Il traite de manière simultanée des données sous forme raster, vecteur et tabulée.

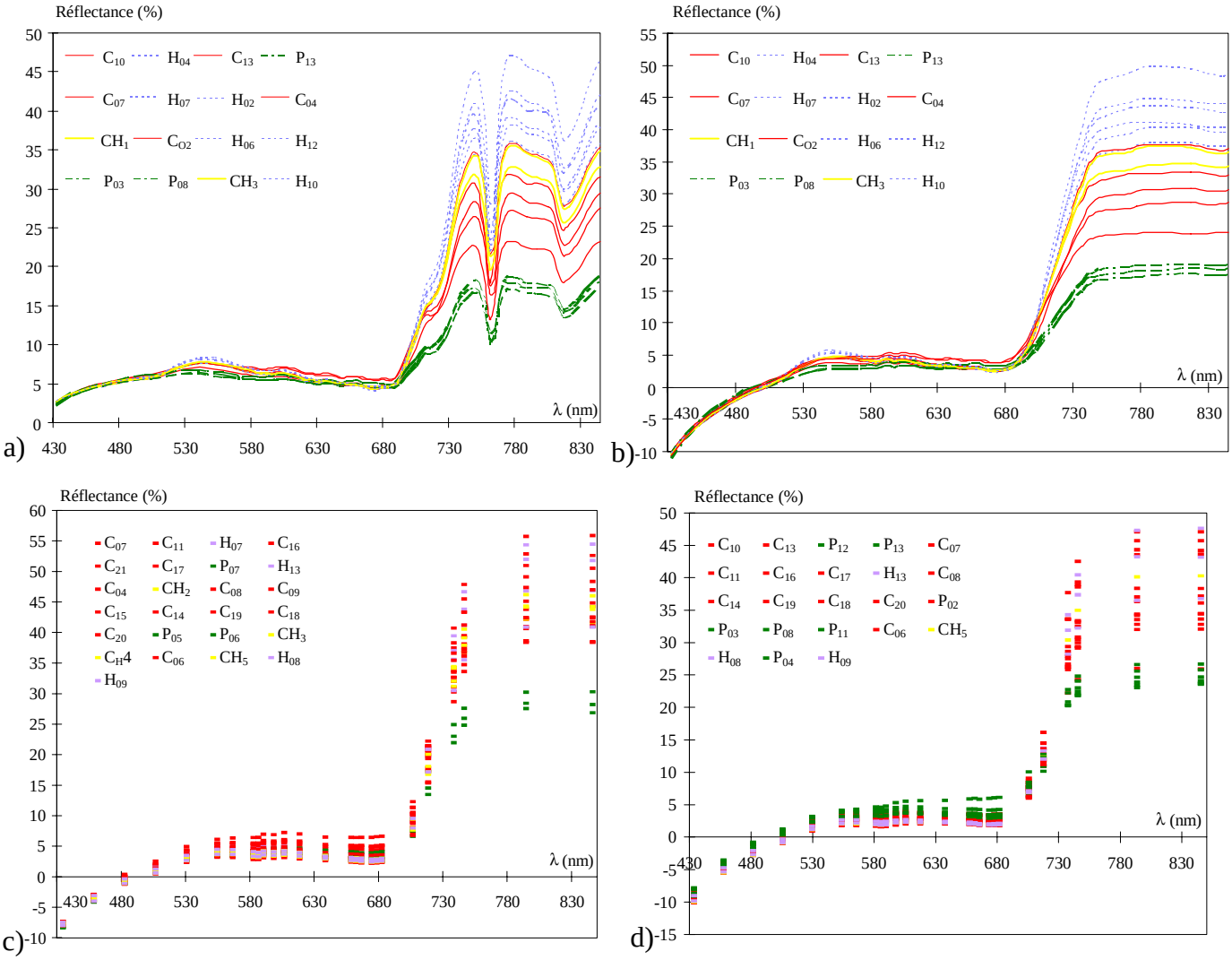


Figure II.2 : Spectres ROSIS de parcelles de chênes (C), hêtres (H), pins (P), et chênes+hêtres (CH). Mai : spectres bruts (a) et corrigés des effets atmosphériques (b). Juillet : spectres acquis au nadir (c) et à 20° (d), corrigés des effets atmosphériques. Les minima locaux des réflectances brutes (a) sont dus à l'absorption gazeuse d'O_2 (762 nm) et d'H_2O (720 nm, 820 nm).

Ce type de logiciel facilite l'analyse d'informations issues de différentes sources. Dans notre cas, il s'agit d'information de télédétection et de terrain. Les principaux traitements réalisés sont indiqués ci-dessous :

1- Création d'une carte " terrain " à partir de plusieurs fichiers :

- carte ONF (fichier vecteur) des limites administratives (routes, voie ferrée, ...) du site.
- carte ONF (fichier polygone) de la nomenclature des parcelles (carte " peuplement ").
- fichier vecteur des limites des 52 parcelles mesurées, fourni par le LEV.

2- La carte" terrain " a été référencée par une table d'attributs contenant les différentes mesures terrain (LAI, chlorophylle, ...) effectuées pour les 52 parcelles.

3- Les images ROSIS et SPOT ont été géoréférencées (affectation de coordonnées géographiques) dans le même système que la carte "terrain". Ces données ont ainsi pu être projetées dans le même référentiel, ce qui les a rendu superposables.

4- Le croisement des images ROSIS et SPOT et de la carte " terrain " a permis de calculer les réflectances moyennes pour chaque parcelle survolée. Au préalable, les limites de la carte terrain ont été élargies pour minimiser les effets de bord (routes, chemins, etc.) associés à l'inévitable imprécision (≈ 1 pixel) des corrections géométriques et de la carte des limites. Les réflectances moyennes des parcelles échantillonnées sur le terrain ont été utilisées pour établir des relations statistiques avec les paramètres biophysiques mesurés.

5- L'application des relations obtenues à l'étape (4) à toutes les parcelles de Fontainebleau (carte " peuplement ") offre la possibilité de générer des cartes de paramètres biophysiques (PAI, chlorophylle) pour l'ensemble de la forêt.

III MÉTHODOLOGIE

Les relations statistiques entre réflectances et paramètres biophysiques ont été établies à partir des réflectances SPOT et ROSIS corrigées des effets atmosphériques. Deux indices spectraux classiques ont été utilisés pour l'étude du LAI: l'indice de végétation normalisé NDVI (Deering , 1978) et le rapport spectral SR (Jordan, 1969).

$$NDVI = \frac{PIR(\lambda) - R(\lambda)}{PIR(\lambda) + R(\lambda)} \quad \text{et} \quad SR = \frac{PIR(\lambda)}{R(\lambda)}$$

avec $R(\lambda)$ et $PIR(\lambda)$: réflectances dans le rouge et le PIR pour une bande spectrale (λ).

La chlorophylle a été étudiée à partir de la détection du point d'inflexion (λ_i) de la réflectance dans la région spectrale du rouge-proche infrarouge appelée red edge. Cette zone est caractérisée par une augmentation brutale de la réflectance foliaire (Fig. II.3). Cette augmentation est due à une diminution de l'absorption spectrale chlorophyllienne foliaire quand la longueur d'onde varie du rouge au proche infrarouge. Différents travaux conduits à l'échelle de la feuille (Jacquemoud, 1992) ont montré un lien entre la variation $\Delta\lambda_i$ du point d'inflexion (λ_i) et la

concentration de la chlorophylle (µg/cm²). Des études, conduites à l'échelle du couvert, sur des cultures et forêts (Baret *et al.*, 1990, Matson *et al.*, 1994), ont aussi mis en évidence un lien entre (λ_i) et la chlorophylle. Ainsi, Jacquemoud (1992) a considéré le cas de milieux homogènes (cultures) avec une approche théorique basée sur le couplage du modèle de propriétés optiques foliaires PROSPECT (Jacquemoud et Baret, 1990), d'un modèle de transfert radiatif du couvert (SAIL) et du modèle atmosphérique 6S. Il a montré qu'au niveau du couvert, (λ_i) est très sensible au LAI et à la concentration en chlorophylle. Cette double dépendance n'a pas permis à cet auteur de découpler les effets dus à la chlorophylle de ceux dus au LAI. Par contre, cet auteur a montré que (λ_i) est peu sensible aux facteurs perturbateurs tels que la réflectance du sol, les conditions d'illumination et l'atmosphère. Ces propriétés indiquent que, dans le cas de milieux homogènes, (λ_i) peut être un bon indicateur de l'activité photosynthétique des couverts. Qu'en est-il pour une forêt tempérée comme la forêt de Fontainebleau? Ce problème est abordé dans ce chapitre de manière empirique avec les données ROSIS acquises sur la forêt de Fontainebleau. La méthode utilisée pour déterminer (λ_i) est présentée ci-dessous.

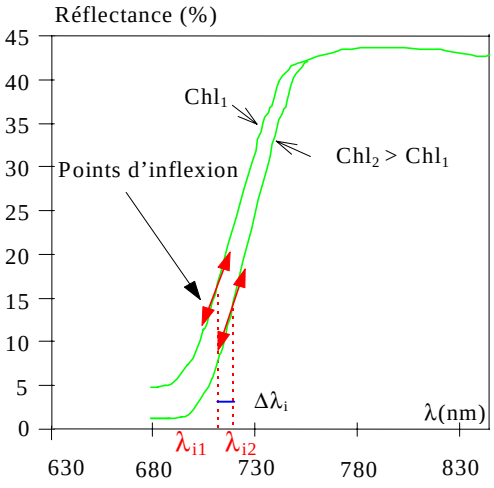


Figure II.3 : Translation $\Delta\lambda_i$ ($=\lambda_{i1}-\lambda_{i2}$) du λ_i de la réflectance foliaire (ρ) pour une augmentation de la concentration en chlorophylle (Chl). Cette augmentation diminue ρ_{rouge} et ne modifie pas ρ_{PIR}, ce qui déplace (λ_i) vers les grandes longueurs d'ondes.

La position du point d'inflexion (λ_i) ne peut être directement dérivée de la mesure de la réflectance spectrale du couvert car un ensemble de points de mesure ne constitue pas une fonction mathématique. La méthode retenue a donc consisté à ajuster une fonction aux réflectances ROSIS dans la région "rouge-proche infrarouge". Conformément à l'approche de Miller (1990), une demi-gaussienne a été utilisée en raison de sa bonne représentation de la réflectance foliaire dans cette région du spectre électromagnétique. Elle est donc bien adaptée pour minimiser l'influence du bruit des mesures de télédétection tout en permettant de calculer analytiquement λ_i. Dans ce

travail, le bruit expérimental a été très fortement réduit, car l'analyse a été conduite avec les réflectances moyennes des parcelles. L'expression de la fonction gaussienne utilisée est :

$$R(\lambda)= R_s-(R_s-R_o).\exp\left[-\frac{(\lambda_o-\lambda)^2}{2\sigma^2}\right]$$

Le point d'inflexion de R(λ) est défini par: $\lambda_i = \lambda_o + \sigma$ car $R''(\lambda)= \left[\frac{(\lambda_o-\lambda)^2}{\sigma^2} -1\right].\frac{(R_s-R_o)}{\sigma^2}.\exp\left(-\frac{(\lambda_o-\lambda)^2}{2\sigma^2}\right)$

La détermination de (λ_i) pour chaque parcelle a donc nécessité le calcul des quatre paramètres libres R_s, R_o, λ_o et σ à partir des réflectances ROSIS de chaque parcelle, dans la région du red edge. Cette inversion a été réalisée avec la méthode itérative du simplex en utilisant la procédure fmins (Press *et al*, 1992). Pour cela, R_s, R_o, λ_o et σ sont respectivement initialisés aux réflectances ROSIS maximales et minimales, trouvées dans la zone du red edge [630-750nm], à la longueur d'onde (nm) de R_o et à 20nm. La convergence est d'autant plus rapide que le jeu initial de paramètres (R_o, λ_o, σ, R_s) est proche de la solution recherchée. Il existe toujours un risque d'obtenir des valeurs correspondant à des minima locaux si la solution n'est pas unique, en particulier si le jeu de paramètres d'entrée est trop éloigné de la solution exacte. Diverses études (Fourty *et al*., 1996) ont déjà montré que la méthode du simplex est un bon compromis entre la robustesse de la solution obtenue et le temps de calcul.

IV RÉSULTATS ET ANALYSE DES DONNÉES DE TÉLÉDÉTECTION

IV.1. Analyse des images ROSIS et SPOT

Toutes les images ROSIS acquises dans le proche infrarouge, quelle que soit la date et le mode d'acquisition, permettent de distinguer nettement les peuplements gaulis et perchis d'une part et les futaies et semenciers d'autre part. La figure II.4 illustre cette distinction, avec une image ROSIS acquise dans le PIR. La plupart des gaulis et perchis ont une texture lisse avec des teintes claires (fortes réflectances) alors que les futaies et semenciers ont une texture beaucoup plus granuleuse et des teintes plus sombres (faibles réflectances). Dans les semenciers, nous arrivons à distinguer le sous-bois (parcelle CH_3, en haut à droite de l'image). L'aspect granuleux de ces parcelles est dû aux couronnes d'arbres ainsi qu'à leurs ombres. Ces ombres sont perceptibles à la résolution de 5.6m. Elles sont orientées de la gauche vers la droite de l'image (Fig. II.4). Les teintes les plus

sombres, *i.e.* les plus faibles réflectances, de l'image ROSIS, sont observées pour les pins. L'image SPOT acquise dans le PIR (Fig. II.5.b) permet également de distinguer les décidus des conifères, et de repérer les perchis et gaulis (zones claires entourées de limites noires). La plupart des différences indiquées ci-dessus ne sont pas perceptibles dans les images ROSIS et SPOT acquises dans le visible (Fig. II.5.a).

L'analyse visuelle précédente indique qu'il existe des différences radiométriques entre les gaulis/perchis d'une part et les futaies et semenciers d'autre part. Quel est le degré de signification de ces différences? Existe-t-il des différences associées aux espèces? Ces questions sont brièvement discutées ci-dessous, après un rappel des principales causes possibles :

- propriétés optiques foliaires différentes,
- différences de LAI,
- architectures différentes du couvert. Un effet "structure" peut intervenir à deux niveaux: à l'échelle de la parcelle, avec la densité et les dimensions des arbres, et également à l'échelle du houppier avec le LAD (planophile pour le hêtre et supposé sphérique pour le chêne). Ainsi, les houppiers des futaies présentent des variations en hauteur beaucoup plus importantes que celles des perchis ou gaulis, ce qui induit des effets d'ombre plus prononcés au sein de la canopée.

L'analyse des spectres ROSIS des parcelles, en mai et juillet (Fig. II.2, Annexe 4 : Tab.A4.1 à 3), apporte quelques éléments de réponse. Les spectres de mai, révèlent des différences significatives à 95% dans le PIR. Ainsi, les réflectances PIR sont maximales pour les hêtraies (≈40%), intermédiaires (≈30%) pour les chênaies et minimales pour les pinèdes (≈20%). Ces caractéristiques semblent indiquer un effet "espèce" dû à des différences entre les propriétés spectrales foliaires des espèces. Or, cet effet n'apparaît pas sur les données ROSIS et SPOT de juillet. De plus, les mesures effectuées en laboratoire (Demarez *et al.*, 1997; Annexe 3) ont montré que les réflectances VIS et PIR des feuilles de chênes et de hêtres sont très similaires sur toute la période de mai à octobre. Les différences notées sur les images SPOT et ROSIS ne semblent donc pas dues aux propriétés optiques foliaires. En fait, sur les données ROSIS du mois de mai, les hêtraies sont essentiellement des perchis et gaulis alors que les chênaies sont surtout des futaies et semenciers. Ainsi, ce qui paraissait être un effet "espèce" est plutôt un effet "structure" et/ou "LAI".

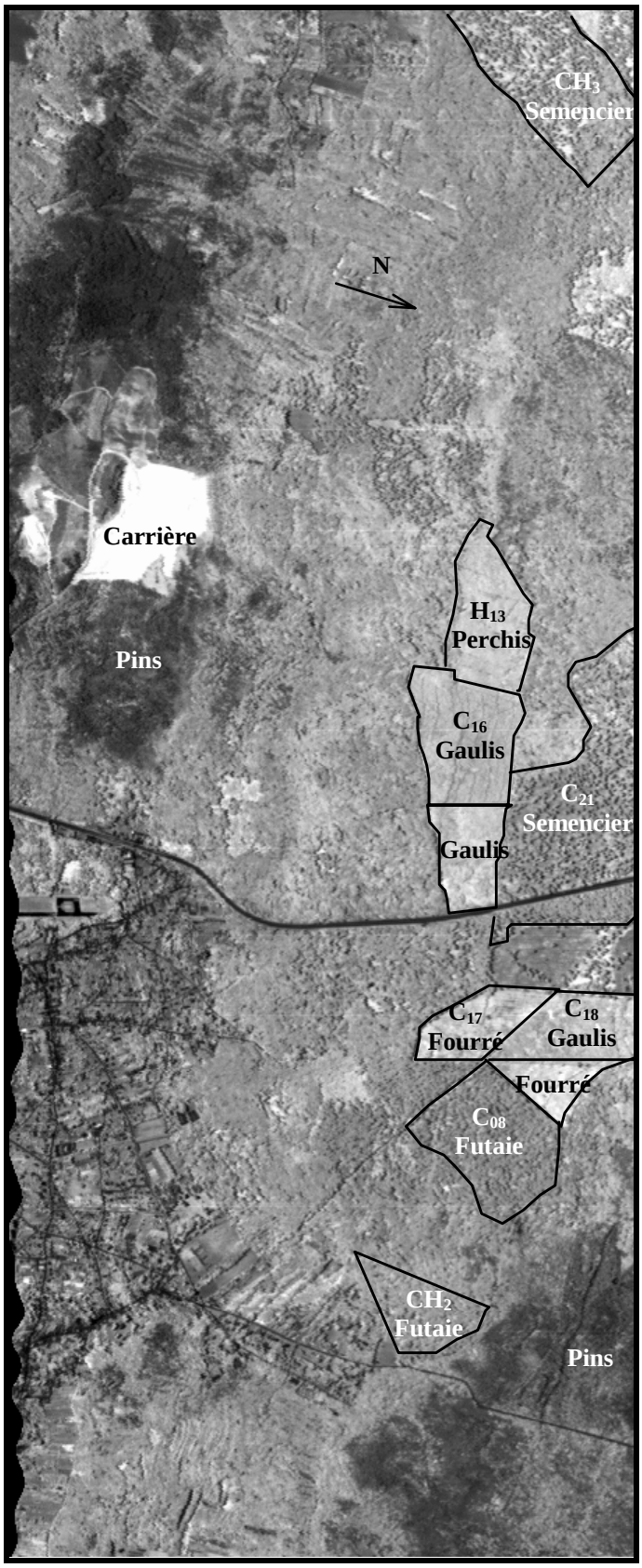


Figure II.4 : Extrait d'image ROSIS (2km×5km) de la Forêt de Fontainebleau acquise dans le PIR (801nm) en juillet (Nadir). Les principaux peuplements (gaulis, perchis, futaies et semenciers) survolés sont représentés. Résolution spatiale : 5.6m



a)



b)

Figure II.5 : Image SPOT de la forêt de Fontainebleau (10 juillet 1994). a) Rouge b) PIR. Les parcelles de teintes claires (bordures noires) sont des perchis, gaulis et fourrés. Les autres feuillus, notamment les futaies et semenciers, apparaissent avec des teintes intermédiaires. Les pins ont les teintes les plus sombres.

Est-il possible de dégager l'importance relative des effets de la structure et du LAI? Les quelques exemples donnés ci-dessous indiquent des tendances et ont pour but d'aborder cette analyse. Les mesures ROSIS de mai révèlent que les futaies de hêtres H_{12} ($\rho_{PIR} \approx$ 40%, PAI ≈ 4.25) et H_{03} (ρ_{PIR} ≈ 38%, PAI ≈ 4.1) ont des réflectances supérieures aux futaies de chênes C_{19} (ρ_{PIR} ≈ 35%, PAI ≈ 4.8), C_{03} (ρ_{PIR} ≈ 36%, PAI ≈ 5.9) et C_{04} (ρ_{PIR} ≈ 37%, PAI ≈ 5.8). Les futaies de hêtres de PAI inférieurs à ceux des futaies de chênes devraient avoir des réflectances inférieures si le facteur "PAI" était prédominant : en l'absence d'effet "structure", la réflectance ρ_{PIR} du couvert augmente avec le PAI. De même, le perchis H_{01} (PAI ≈ 3.4) a une réflectance (≈ 44%) supérieure à celles des futaies H_{03} (ρ_{PIR} ≈ 38%), et H_{12} (ρ_{PIR} ≈ 40%), alors que son PAI est plus faible. Les différences sont en général plus marquées entre les perchis de hêtres et les futaies de chênes qu'entre les perchis et futaies d'une même espèce. Des tendances similaires sont observées avec les données ROSIS de juillet (nadir et 20°). Ainsi, les gaulis et perchis ont des réflectances plus fortes que les semenciers et futaies (Annexe 4; A4.2,3). Par exemple, les futaies C_{06}, C_{04} et C_{19} (PAI ≈6) ont des réflectances plus faibles que les gaulis C_{16} (PAI ≈ 2.97) et C_{18} (PAI ≈ 6.3). Il est intéressant de noter que toutes les réflectances (ρ_{VIS} et ρ_{PIR}) des parcelles diminuent quand on passe du nadir à 20°. Par exemple, le gaulis C_{18} (PAI ≈ 6.3) a une réflectance ρ_{PIR} ≈ 51% au nadir et ρ_{PIR} ≈ 46% à 20°, et le gaulis H_{08} (PAI ≈ 6.4) à une réflectance ρ_{PIR} ≈ 55% au nadir et ρ_{PIR} ≈ 43% à 20°. Cette décroissance est relativement surprenante. Elle pose le problème de la fiabilité des mesures ROSIS, du moins pour interpréter les différences entre les deux configurations de visée de juillet.

Contrairement aux milieux homogènes, le PAI n'apparaît donc pas comme le principal paramètre explicatif du comportement du couvert dans le PIR. La structure semble jouer un rôle plus important. L'influence non fondamentale du PAI est bien illustrée par les faibles corrélations (r^2<0.6) entre la réflectance PIR et le PAI pour toutes les données ROSIS et SPOT (Fig. II.6).

En fait, nous ne pouvons indiquer ici que des tendances, en raison du faible nombre de parcelles à la fois survolées et échantillonnées. Deux approches ont donc été envisagées pour tester le bien-fondé de l'effet "structure" : une approche empirique avec la classification de l'image SPOT et une approche théorique avec des simulations DART.

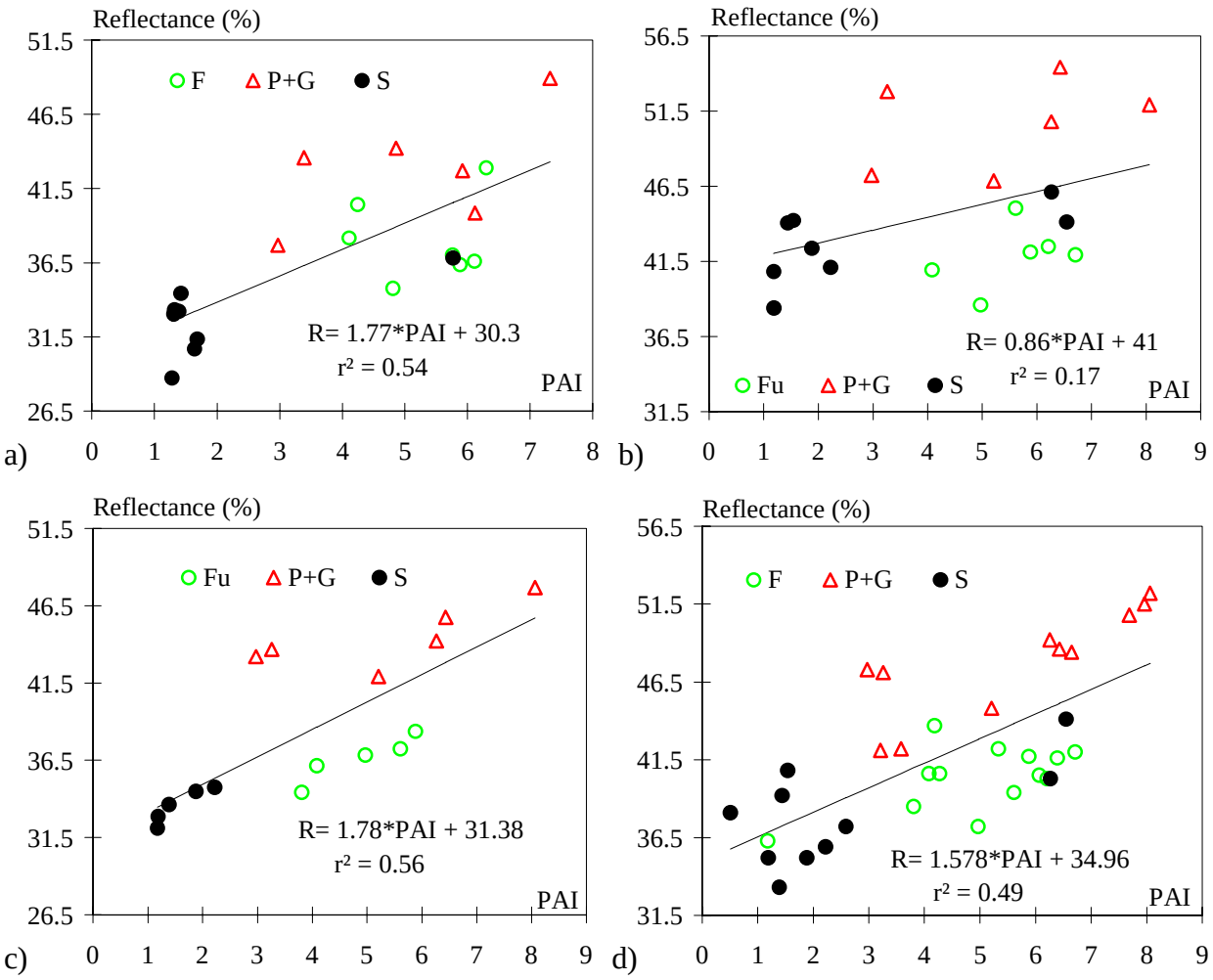


Figure II.6 : Réflectances PIR en fonction du PAI des parcelles. ROSIS: a) mai. b) Juillet (nadir). c) juillet (20°). SPOT: d) juillet.

• Classification

L'objectif a été de déterminer si les différences entre les réflectances moyennes ρ_{PIR} et ρ_{VIS} des perchis/gaulis, semenciers, futaies et conifères, significatives au niveau des parcelles, sont aussi significatives au niveau des pixels. Cette analyse a été conduite avec la classification de l'image SPOT, ce qui a permis de classer l'ensemble de la forêt (Fig. II.7.b). Quatre classes principales ont été considérées : Gaulis-Perchis, Futaie, Semenciers et Pins. D'autres classes (*i.e.*, parcelles agricoles à différents stades, routes, ville et eau) ont également été définies. La méthode de classification utilisée est la méthode barycentrique supervisée (ILWIS, 1997). La première étape a consisté à sélectionner des échantillons des classes indiquées ci-dessus. Ces derniers ont été choisis, par interprétation visuelle de la composition colorée SPOT (Fig. II.7.a), indépendamment des 52 parcelles échantillonnées sur le terrain. Cette indépendance a permis d'utiliser les 52

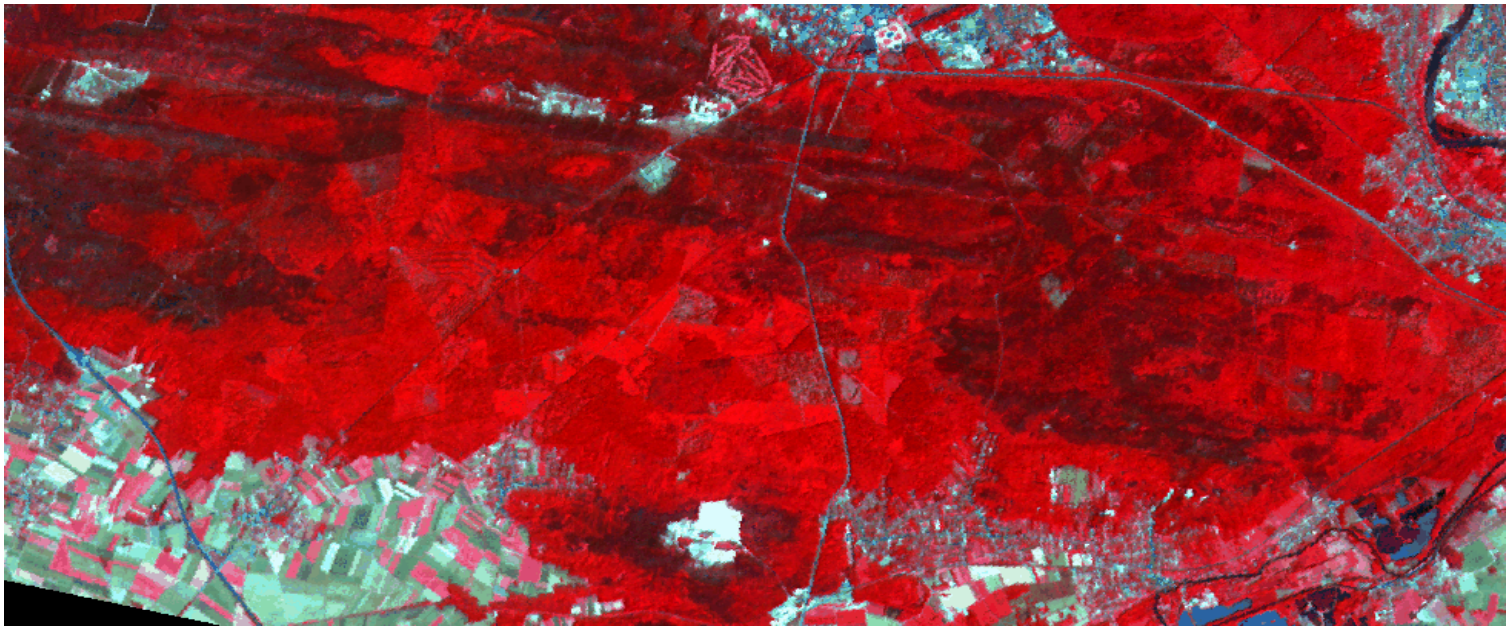
parcelles pour évaluer la précision de la classification. Aucun travail d'élimination de pixels erronés à l'intérieur des échantillons n'a été effectué.

Le pourcentage d'échantillons bien classés est indiqué dans la matrice de confusion (Tab. II.3). Il apparaît que 96.5% des pixels "pins", 73.7% de "perchis-gaulis" et 54.4% de" futaie" ont été bien classés. Les semenciers sont les parcelles les moins bien classées (35%), ce qui n'est pas étonnant étant donné leur hétérogénéité spatiale. En effet, ces parcelles correspondent à la juxtaposition de pixels de réflectance très variable, qui sont donc classés soit en "futaie" soit en "perchis-gaulis". Il est également intéressant d'observer qu'aucun pixel appartenant à des perchis-gaulis n'a été classé en semencier ou en pins. De même, aucun pixel de parcelle de pins n'a été classé en futaie. Ces résultats soulignent le fait que du point de vue de la radiométrie, les parcelles de perchis-gaulis, de futaies et de conifères sont à la fois homogènes et très différentes, *i.e.*, les écart-types de leurs classes spectrales sont relativement faibles alors que les moyennes sont nettement distinctes. Les plus importantes différences surviennent dans le proche infrarouge. La précision de la carte obtenue, certes préliminaire, illustre l'intérêt de la télédétection pour des applications telles que la gestion du domaine forestier.

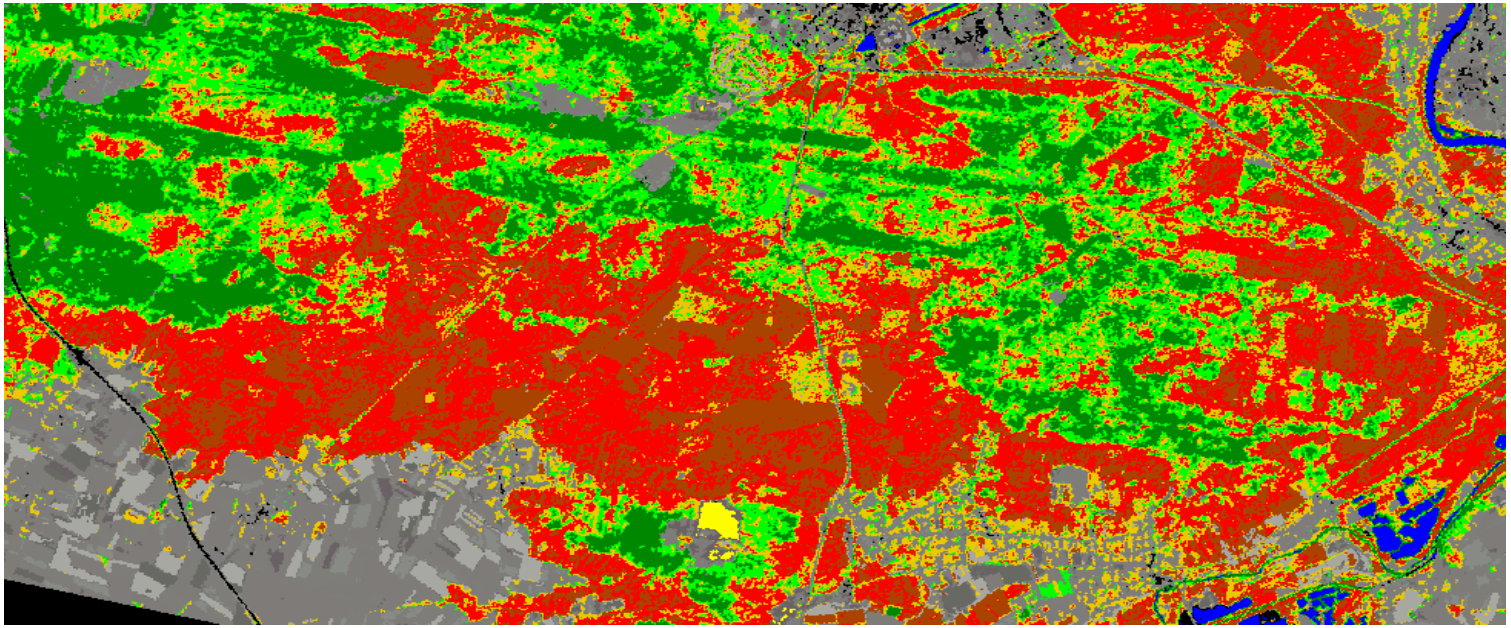
La classification réalisée a mis en évidence l'importance de l'effet structure. Elle n'apporte cependant pas de preuve quand à l'influence relative du PAI et de la structure. Ceci explique pourquoi un modèle de réflectance, adapté aux couverts forestiers, peut être un outil d'analyse très intéressant, sinon indispensable. Des simulations ont été réalisés avec le modèle DART pour illustrer concrètement l'intérêt de la modélisation et également pour étayer nos hypothèses concernant l'influence de la structure du couvert sur la réflectance proche infrarouge.

	Pins	Perchis-Gaulis	Semencier	Futaie	Nb pixels
Pins	96.58%	0%	1.11%	0%	5208
Perchis-Gaulis	0%	73.76%	0%	17.38%	8899
Semencier	8.69%	17.58%	35.05%	54.39%	13974
Futaie	0.31%	16.88%	1.28%	75.40%	14941
Nb pixels	6419	9874	5441	21288	43022

Tableau II.3 : Matrice de confusion de la classification de l'image SPOT



a)



b)

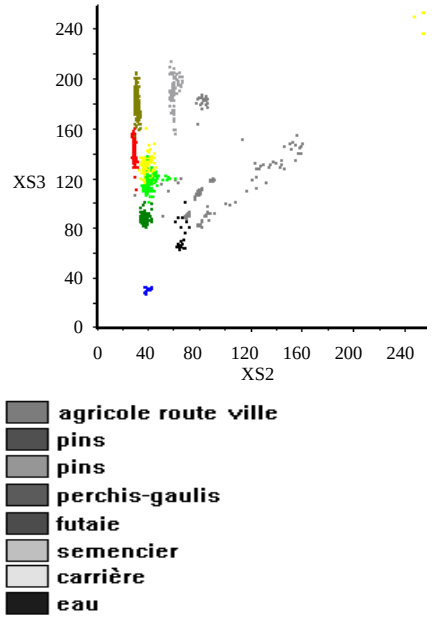


Figure II.7:

Composition colorée (a)
et
Classification (b)

de la forêt de Fontainebleau

• Modélisation

Les réflectances R_{PIR} de trois types de couverts (*i.e*. perchis, futaie et semencier) ont été simulées et comparées, à différentes résolutions spatiales (Fig. II.8). Les paramètres optiques et architecturaux utilisés pour construire les maquettes sont indiqués dans le tableau II.4. Les caractéristiques allométriques employées sont les valeurs moyennes mesurées sur le terrain. Les réflectances foliaires et le sous-bois sont identiques pour les trois parcelles. Seule la structure change de manière à mieux mettre en évidence son influence. Le sous-bois étant inconnu, son albédo a été fixé arbitrairement à 20%. Les maquettes des parcelles ont été simulées avec des cellules de 20cm pour le perchis (dégradé en suite à 70cm) et 70cm pour la futaie et le semencier. Les réflectances DART sont maximales pour le perchis (≈44%), minimales pour le semencier (≈24%) et intermédiaires pour la futaie (≈37%). Cette tendance est tout à fait conforme à celle observée sur les images ROSIS et SPOT dans le proche infrarouge. La différence entre les perchis et futaies se conserve même si l'albédo du sous-bois augmente jusqu'à 45%. Elle s'accentue si le LAD est planophile pour le perchis (*i.e*. hêtraie) et sphérique pour la futaie (*i.e*. chênaie). Dans ce cas, les réflectances du perchis et de la futaie sont égales respectivement à 50 et 30%.

Nous avons également testé la capacité du modèle DART à représenter la variabilité spatiale du signal de télédétection, en particulier d'images ROSIS. Pour cela, nous avons dégradé la résolution spatiale des images DART (Fig. II.8) de 0.7m à 5.6m (ROSIS). La similitude des images DART et ROSIS illustre l'intérêt et la fiabilité de ce modèle pour étudier les images de télédétection. En effet, la dégradation spatiale conduit à des textures similaires à celles observées avec les images ROSIS : texture lisse pour les perchis, intermédiaire pour les futaies et plus hétérogène pour les semenciers.

Finalement, afin de comparer les effets "structure" et "LAI", la réflectance R_{PIR} des parcelles précédentes de perchis et de futaies a été simulée pour des LAI variant de 2 à 8 (Tab. II.5). A partir d'un LAI supérieur à 4 la variation de R_{PIR} est expliquée essentiellement par la structure. Ainsi, une variation $\Delta LAI = +4$ diminue R_{PIR} de ΔR=-0.4% pour la futaie et de ΔR = -0.3% pour le perchis. Cette différence est très faible par rapport à la différence de réflectance entre les perchis et les futaies de même LAI ; *e.g*., pour LAI=4, la variation de R_{PIR} entre le perchis et la futaie atteint 7%. Par contre, pour des LAI plus faibles (<3), les simulations DART indiquent que le sous-bois devient un facteur perturbateur majeur. La diminution des réflectances de couverts au-delà d'un LAI de 6 s'explique par une augmentation de l'opacité des couronnes qui rend les ombres plus sombres, alors que la réflectance des houppiers augmente très peu. Cet effet a déjà été observé avec des

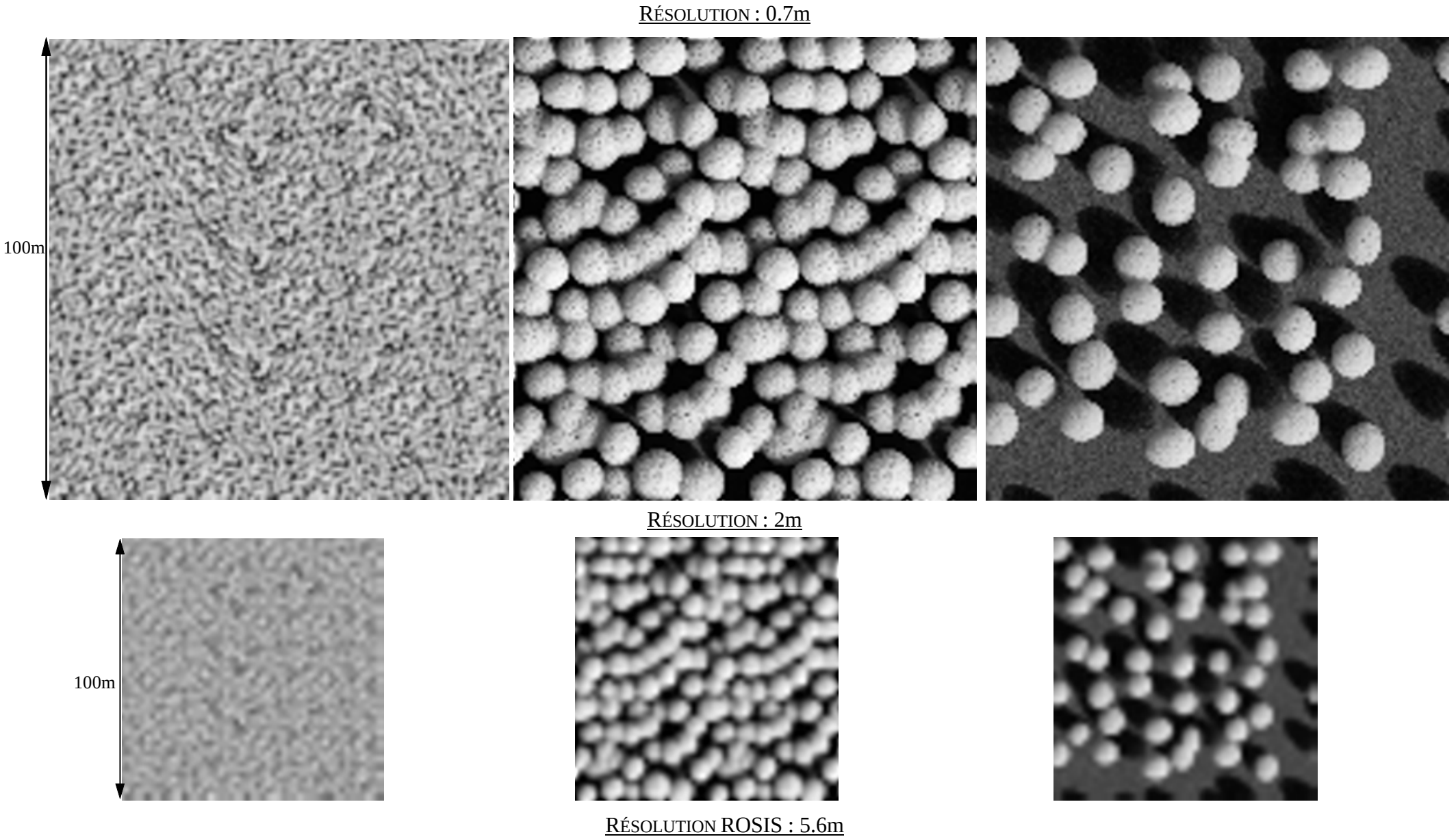


Figure II.8: SIMULATIONS DART

données Push-Broom sur la forêt des Landes (Pinel, 1997), pour des LAI plus faibles. En résumé, la classification et les simulations DART soulignent l'importance de l'effet structure pour expliquer les différences de réflectances ROSIS et SPOT entre les parcelles.

	Perchis	Futaie	Semencier
LAI	6	6	1.5
Réflectance et transmittance foliaire	ρ=τ=45%	ρ=τ=45%	ρ=τ=45%
Albédo du sol	20%	20%	20%
Diamètre moyen des houppiers	1.6m± 0.5m	10± 1m	10± 1m
Épaisseur moyenne des houppiers	10m ± 1m	9± 4m	9± 4m
Dimension moyenne des feuilles	5cm	5cm	5cm
Densité d'arbres/ha	4954	530	42
LAD	planophile	planophile	planophile
Taille de la parcelle	100m×100m	100m×100m	100m×100m
Taux de couverture	96%	92%	30%

Tableau II. 4 : Paramètres utilisés pour simuler les maquettes.

	Futaie	Perchis
LAI = 2	27%	39%
LAI = 4	37%	44%
LAI = 6	37%	44%
LAI =8	36.6%	43.7%

*Tableau II.*5 : Réflectances DART de perchis et futaies. LAI de 2 à 8.

Les paramètres d'entrée de DART sont indiqués dans le tableau II.4

IV.2. Analyse statistique des spectres ROSIS *vs.* PAI et chlorophylle

L'analyse statistique des spectres ROSIS a été motivée par le souhait de déterminer les bandes spectrales les plus représentatives du PAI et de la chlorophylle. Elle repose sur le calcul des coefficients de corrélation entre ces paramètres biophysiques et les réflectances des parcelles ROSIS (Fig. II.9 et II.11) et SPOT (Tab. II.6) à la fois échantillonnées au sol et survolées (cf. Annexe 4, Tableaux A4.1 à A4.4).

• PAI

La corrélation (Fig. II.9) entre les réflectances ROSIS de mai et le PAI des parcelles échantillonnées (pins + feuillus) montre une corrélation significative à 95% dans le bleu-vert (r≈-0.39), le rouge (r≈-0.5) et le proche infrarouge (r≈0.35). Les domaines spectraux où les corrélations ne sont pas significatives sont [430 460nm], [500 610nm] et une partie du red edge [690 710nm]. La faible valeur des corrélations obtenues nous a conduit à distinguer les feuillus des conifères (Fig. II.9.b).

Les corrélations sont ainsi légèrement améliorées dans le vert (r≈0.4), et surtout dans le PIR (r≈0.6), alors que la corrélation dans le bleu-vert devient non significative. L'obtention de corrélations positives dans le bleu et le vert pose le problème de la validité des résultats dans ces domaines spectraux, d'une part à cause des problèmes d'étalonnage du capteur ROSIS et d'autre part à cause des grands intervalles d'incertitude associés au faible nombre de parcelles survolées.

Les résultats obtenus avec les images ROSIS de juillet diffèrent sensiblement de ceux obtenus avec les images ROSIS de mai (Fig. II.9.c et d). Ainsi, pour la visée au nadir, la corrélation est significativement négative dans le visible avec de faibles différences spectrales entre le vert et le rouge (r≈-0.7 dans le vert et le rouge) mais est relativement faible dans le PIR (r≈0.5). Il est intéressant de remarquer que lorsque l'angle de visée devient oblique, la corrélation diminue dans le bleu et le vert, reste stable dans le rouge et augmente dans le PIR. Plusieurs raisons peuvent être invoquées pour expliquer ce comportement. (1) Problèmes d'étalonnage de ROSIS dans le bleu et le vert. (2) Saturation du signal dans le visible, car le PAI apparent augmente comme LAI/cosθ_v. (3) Moindre influence du sol et du sous-bois quand θ_v augmente. Toutefois, les comparaisons entre les données au nadir et à 20° sont à considérer avec beaucoup de prudence, car les parcelles survolées ne sont pas les mêmes. Les corrélations calculées avec les données SPOT de juillet sont comparables aux corrélations obtenues avec ROSIS (Tab. II.6).

La figure II.10 illustre la variation des réflectances vert et rouge des parcelles en fonction du PAI. Pour les données ROSIS de juillet (Nadir et 20°), contrairement aux données ROSIS de mai, une tendance apparaît entre les réflectances Vert/Rouge et le PAI: la réflectance décroît de manière exponentielle avec une augmentation du PAI, ce qui correspond à une corrélation négative. Cette tendance est également observée avec les données SPOT. La forte dispersion des couples "réflectances-PAI", à la fois dans le visible (Fig. II.10) et le PIR (Fig. II.6), confirme la difficulté de calculer le PAI avec un seul canal, en particulier pour des PAI supérieurs à 3.

Les résultats obtenus avec ROSIS ont montré que les longueurs d'onde les plus appropriées pour étudier le PAI sont le rouge et le proche infrarouge. Les résultats obtenus avec SPOT indiquent que le canal vert est équivalent au rouge. D'autre part, le contenu informatif des bandes spectrales étroites est équivalent à celui des bandes spectrales larges qui les encadrent. Une fois de plus, il faut rester prudent, car le faible nombre de points de mesures, disponibles en particulier pour les données ROSIS, ne permet pas de conclure de manière définitive.

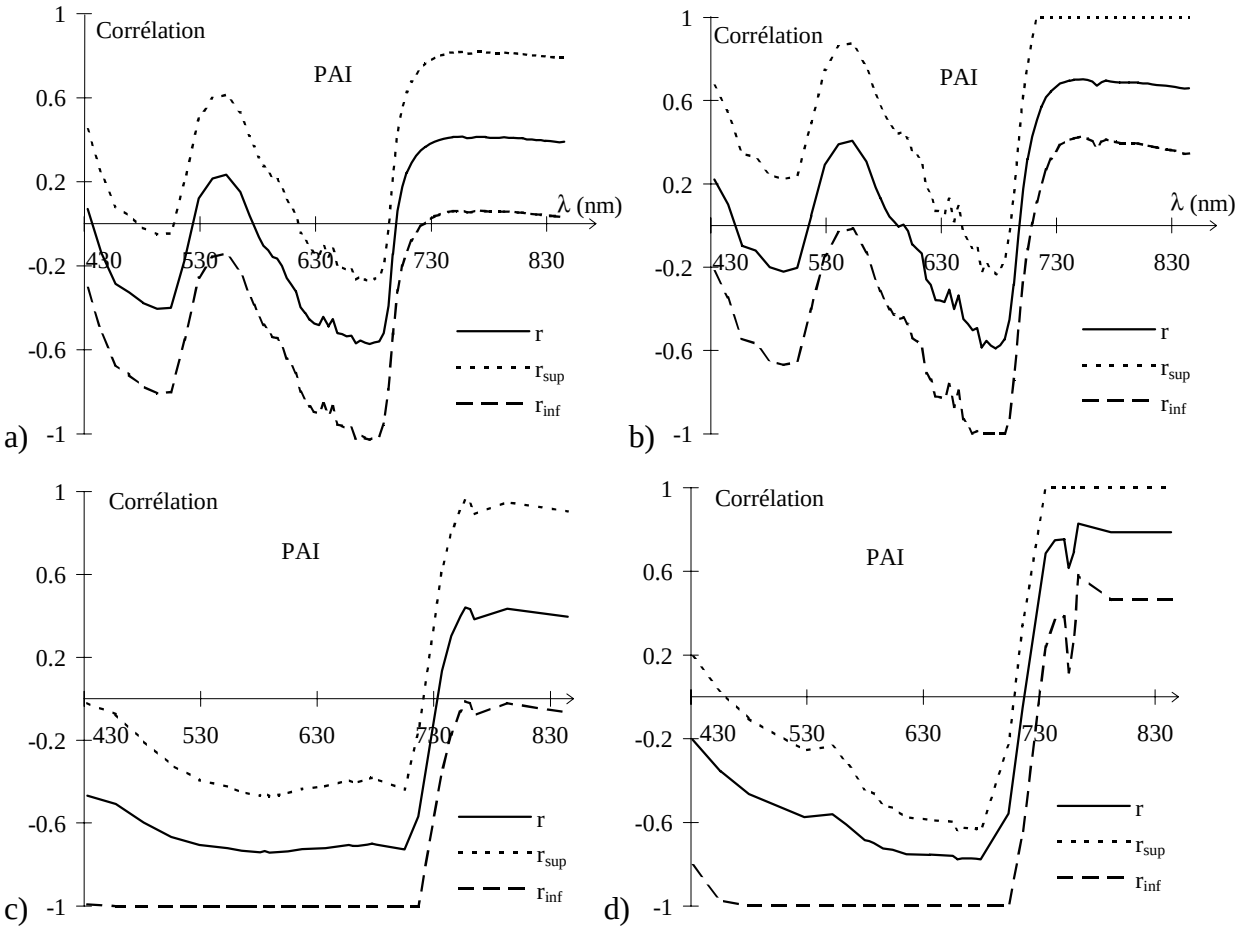


Figure II.9 : Corrélogrammes calculés entre les réflectances ROSIS et le PAI. Mai a) toutes parcelles confondues (feuillus + conifères) et b) pour les feuillus uniquement. Pour juillet Nadir c) et juillet 20° d) pour les feuillus uniquement. L'intervalle de confiance à 95% est [r_{inf} r_{sup}].

• <u>Chlorophylle</u>

La figure II.11 indique les corrélations entre les réflectances ROSIS et la chlorophylle exprimée en µg/cm² foliaire, en mg/g et en g/m² de sol. La chlorophylle exprimée en g/m² de sol est la chlorophylle exprimée en µg/cm² foliaire pondérée par le PAI, et la chlorophylle exprimée en mg/g est la chlorophylle foliaire (µg/cm²) pondérée par la masse surfacique foliaire (LMA, g/cm²).

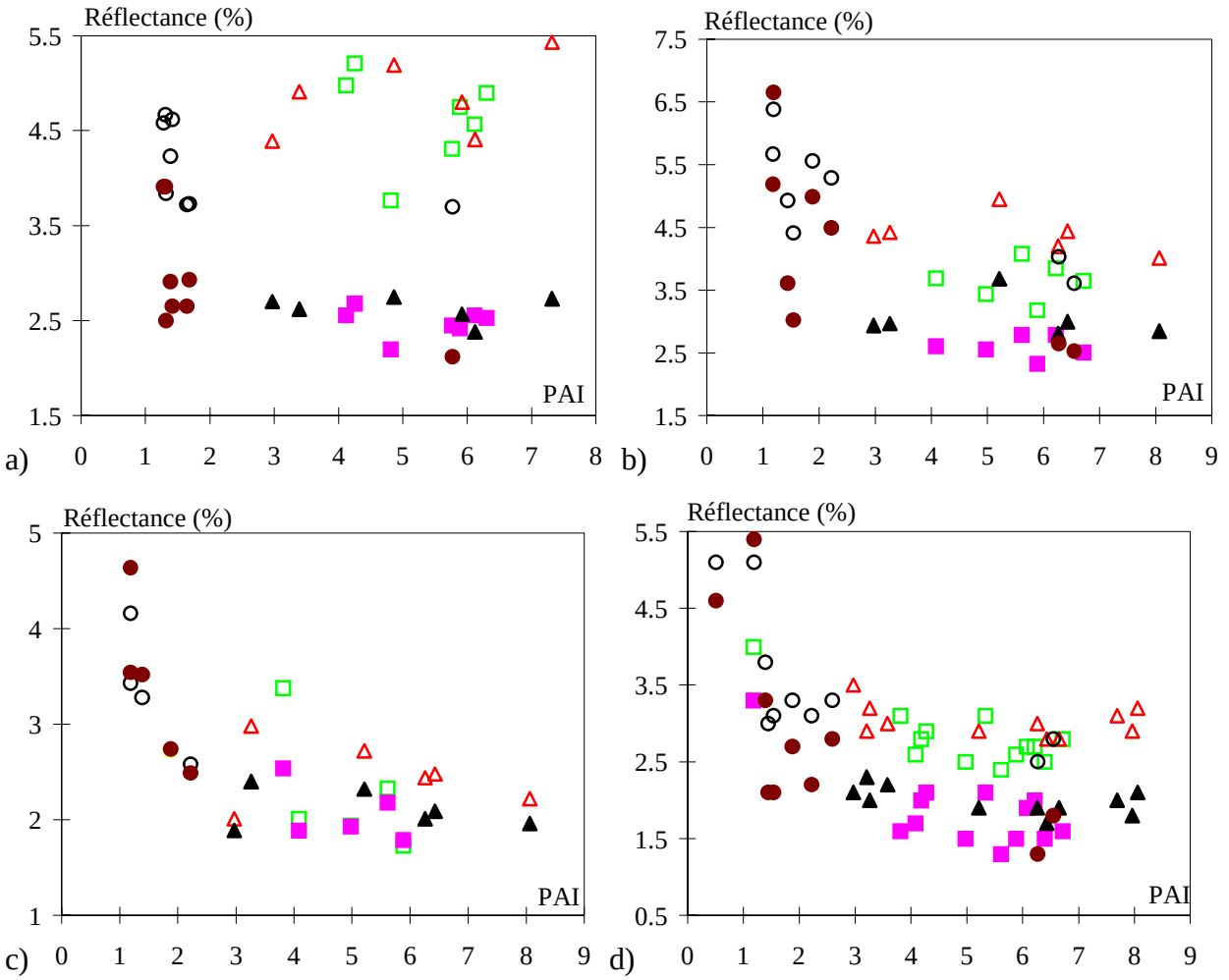


Figure II-10 : PAI et réflectances vert (symboles vides) et rouge (symboles pleins) des parcelles échantillonnées et survolées (Gaulis et Perchis: ∆, Futaie: , et semencier: o). ROSIS: a) mai nadir, b) juillet nadir, c) juillet, 20°. d) SPOT.

Chlorophylle (µg/cm²) : au mois de mai, les corrélations ne sont pas significatives (95%), à l'exception de deux bandes spectrales étroites dans le vert et le rouge (r≈-0.6). Le comportement spectral entre les corrélations de mai et de juillet diffère notablement. Ainsi, en mai les corrélations varient beaucoup dans le visible et sont négatives dans le PIR ce qui est étonnant car la chlorophylle n'influence pas la réflectance foliaire ρ_{PIR}. Par contre, en juillet les corrélations varient très peu dans le visible et ne sont pas significatives à la fois dans le visible et le PIR.

Chlorophylle (mg/g) : aucune corrélation significative n'apparaît, à l'exception du PIR en juillet. Ainsi, r≈0.6 au nadir et r ≈ 0.8 pour θ_v=20°. Ces corrélations relativement fortes sont peut-être dues à la corrélation positive qui existe entre la concentration en chlorophylle foliaire et la masse

surfacique foliaire. Les feuilles de hêtres sont en effet plus fines et ont moins de chlorophylle (µg/cm²) que les feuilles de chêne (Le Dantec, 1996).

Chlorophylle (g/m²) : aux mois de mai et de juillet les seules corrélations significatives surviennent dans le rouge (r<0) et dans le proche infrarouge (r>0). Elles sont en grande partie dues au fait que la chlorophylle a été pondérée par le PAI.

Les canaux SPOT fournissent des corrélations similaires à celles des canaux ROSIS équivalents. Les corrélations les plus fortes (r>0.45) apparaissent dans le PIR pour la chlorophylle exprimée en g/m². Dans tous les autres cas les corrélations ne sont pas significatives.

	Vert	Rouge	PIR
PAI	-0.67 [-1 -0.42]	-0.66 [-1 -0.45]	0.67 [0.44 1]
Chlorophylle : µg/cm²	-0.29 [-0.89 0.3]	-0.38 [-0.99 0.2]	0.08 [-0.52 0.68]
mg/g	-0.39 [-1 0.19]	-0.4 [-1 0.19]	0.46 [-0.1 1]
g/m²	-0.67 [-1 -0.2]	-0.69 [-1 -0.25]	0.64 [0.16 1]

Tableau II-6 : Corrélations entre les réflectances SPOT et la chlorophylle (exprimée en µg/cm², mg/g et g/m²) et le PAI. Les intervalles de confiances (95%) sont entre crochets.

La figure II.12 illustre bien la difficulté d'établir des relations de régression entre la chlorophylle et les réflectances spectrales du couvert. Les couples "réflectance visible - chlorophylle" sont extrêmement dispersés pour toutes les données ROSIS et SPOT. Ce résultat explique le choix d'autres approches (*e.g.* détermination du λ_i) que la simple régression spectrale pour estimer la chlorophylle.

IV.3 PAI *vs.* indices spectraux

La figure II.13 représente la variation du NDVI et de SR avec le PAI pour toutes les mesures ROSIS et SPOT. Dans tous les cas, le NDVI et SR augmentent régulièrement avec le PAI. Le NDVI présente une dispersion plus faible que SR mais sature plus rapidement avec le PAI. Cette saturation semble être atteinte pour des PAI plus faibles en mai (≈ 3-4) qu'en juillet (≈5-6).

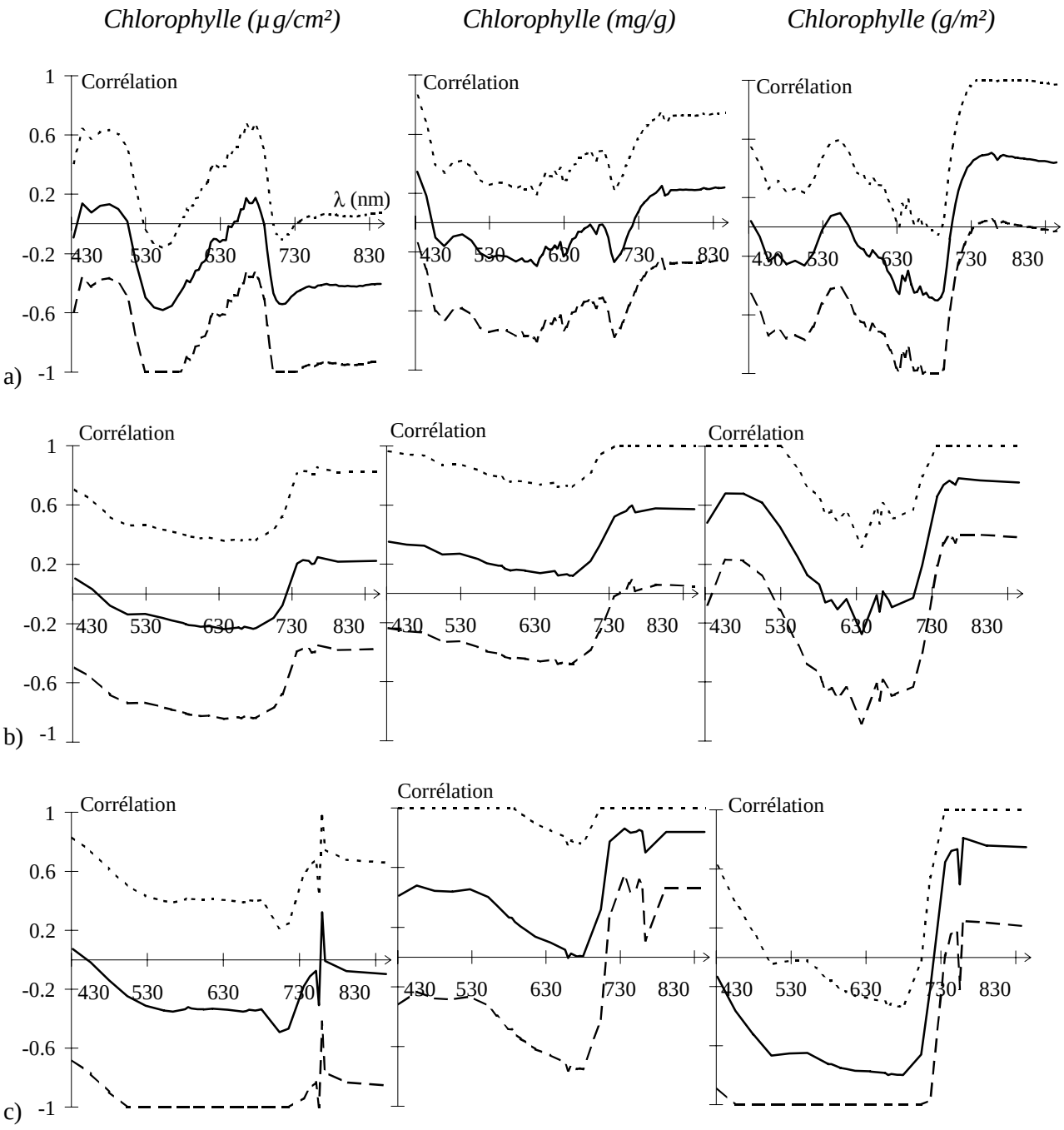


Figure II.11 : Corrélogrammes des réflectances ROSIS et de la chlorophylle exprimée en µg/cm² (gauche), mg/g (centre) et g/m² de surface de sol (droite). a) Mai, b) Juillet, nadir et c) Juillet, 20°.

Nous vérifions que l'utilisation du NDVI améliore l'estimation du PAI par rapport à l'emploi d'une seule bande spectrale. Il est intéressant de constater que la meilleure corrélation "NDVI-PAI" survient pour les mesures de juillet avec la visée oblique 20°: r^2 augmente de 0.67 à 0.87 quand θ_v passe de 0° à 20°. Cette tendance peut être expliquée par une diminution de l'influence du sous-bois

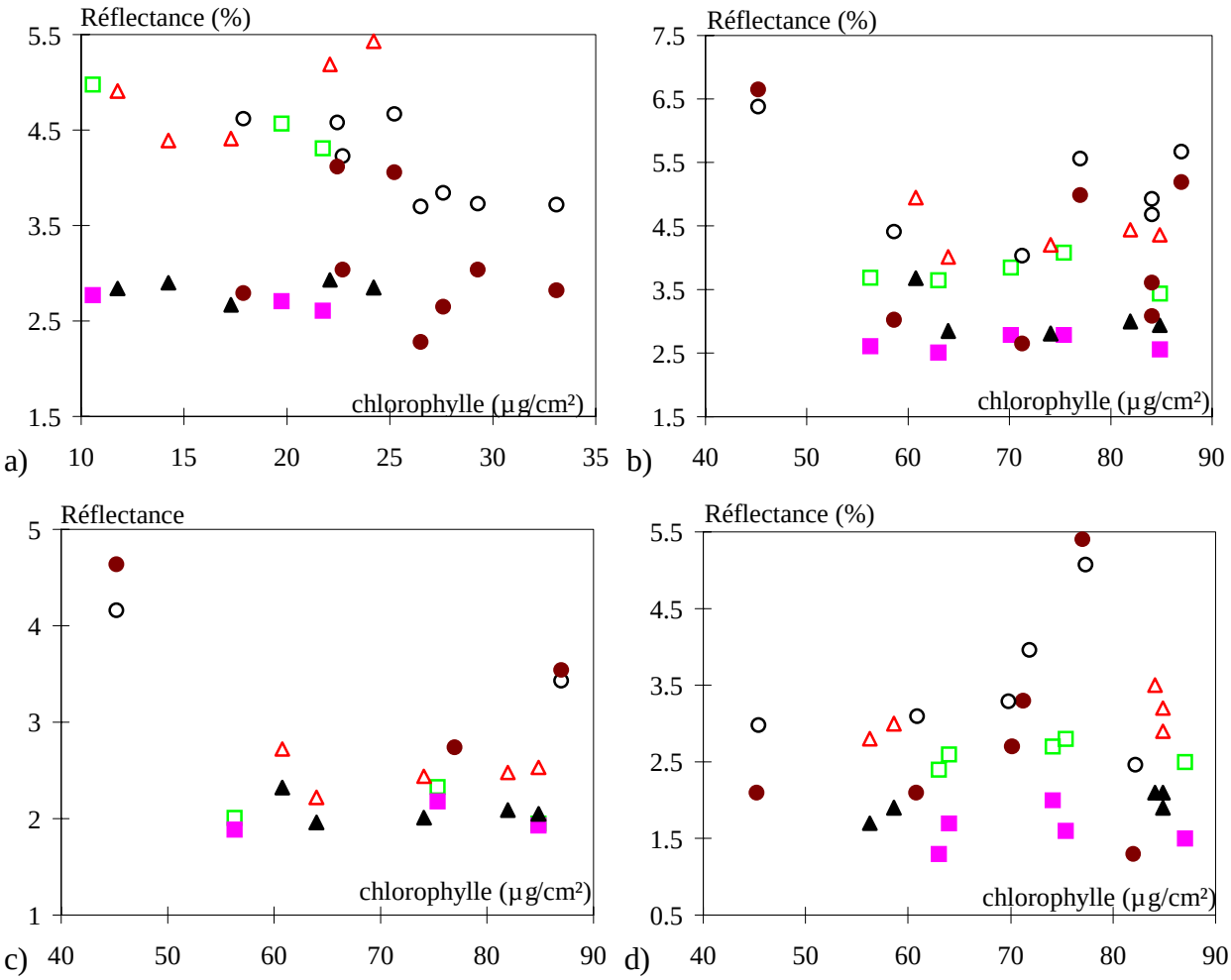


Figure II-12 : Relations entre les réflectances vert et rouge et la chlorophylle (µg/cm²). ROSIS: a) mai, b) juillet nadir, c) juillet, 20° et les données d) SPOT, juillet.

quand la direction d'observation augmente. Toutefois, il faut être prudent quand à la signification d'une telle amélioration. En effet, les deux semenciers C_{09} et CH_3 (LAI ≈1.5) qui, pour les données de juillet acquises au nadir, sont en partie responsables du faible r^2 obtenu, ne sont pas dans l'image acquise à 20°.

La figure II.14 représente le NDVI et SR en fonction du PAI dans le cas des mesures SPOT au sommet et au bas de l'atmosphère. Par rapport au NDVI, le SR donne la meilleure dynamique, tout en présentant une dispersion équivalente. Les indices obtenus à l'aide de mesures SPOT corrigées des effets atmosphériques permettent de retrouver des courbes classiques d'évolution de la réflectance en fonction du PAI : évolution sensiblement exponentielle. D'autre part, les coefficients de détermination sont du même ordre de grandeur ($r^2 \approx 0.65$) que pour ROSIS. Cependant, les relations empiriques diffèrent notablement entre ROSIS et SPOT. Cette différence peut avoir

plusieurs causes : différentes caractéristiques spectrales des capteurs (*e.g.*, largeur spectrale des canaux) et/ou plus grands nombres de parcelles survolées par SPOT.

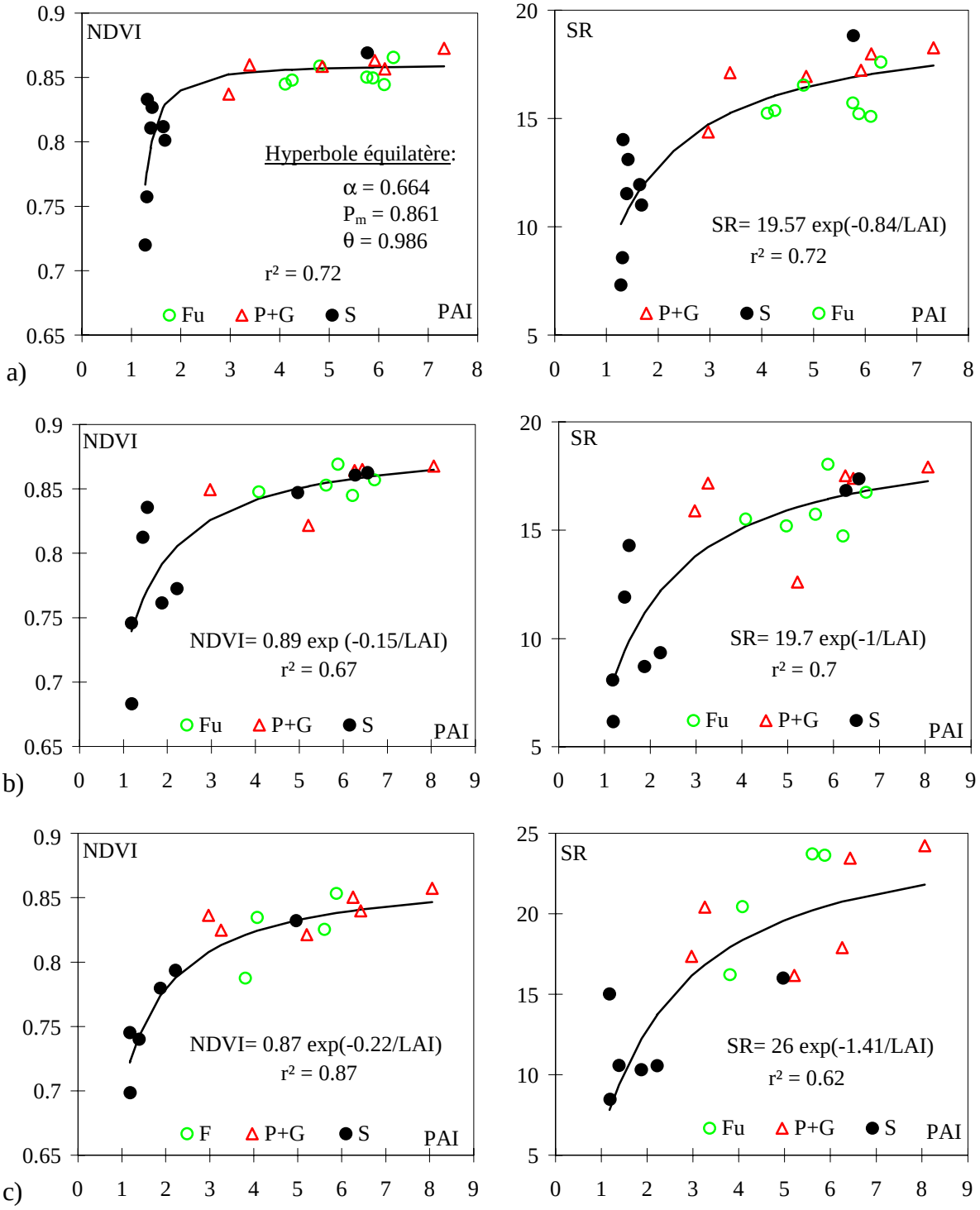


Figure II-13 : NDVI (gauche) et SR (droite) en fonction du PAI. Données ROSIS de mai acquises au nadir (a), juillet au nadir (b) et juillet à 20° (c).

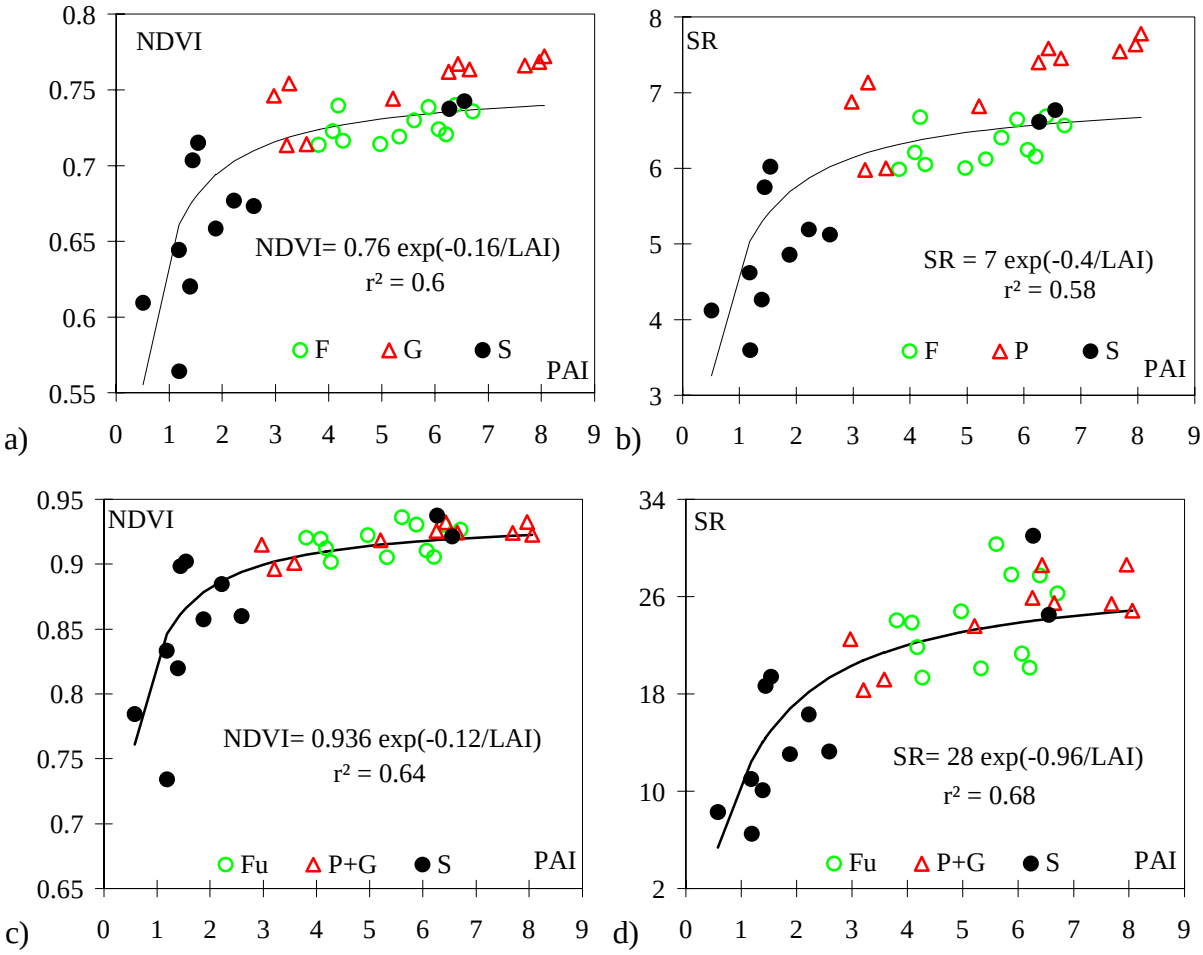


Figure II-14 : NDVI (gauche) et SR (droite) en fonction du PAI. Données SPOT de juillet. (a) haut de l'atmosphère et (b) bas de l'atmosphère.

Ce travail a permis de déterminer des relations empiriques "indice de végétation-PAI" dont la forme est similaire aux variations théoriques escomptées. L'étude conduite avec ROSIS a montré que les relations empiriques sont peu sensibles au choix des longueurs d'ondes dans le rouge et le proche infrarouge. Pour l'étude du PAI, un capteur spectrométrique ne semble pas apporter d'information supplémentaire par rapport à un capteur à bande spectrale large. La valeur relativement faible du coefficient de détermination des relations empiriques indique cependant que leur utilisation peut entraîner des erreurs non négligeables sur l'estimation du PAI. Finalement, il est important d'insister sur le fait que les expressions des relations empiriques varient en fonction de la date d'acquisition, de la direction d'observation et du capteur. Cette variabilité est une contrainte extrêmement limitative pour l'obtention de valeurs précises du PAI à partir de mesures de télédétection. Est-il possible de connaître a priori la relation entre un indice et le PAI, compte tenu des conditions

d'acquisitions, du type de peuplement observé, etc? Seuls les modèles de réflectance peuvent permettre de répondre à cette question.

IV.4. Chlorophylle *vs.* point d'inflexion (λ_i)

Le travail présenté ici a été conduit avec les trois jeux de données ROSIS : les données de mai acquises au nadir (81 bandes spectrales contiguës) et les données de juillet (32 bandes spectrales non contiguës) acquises au nadir et à 20°. Seules les réflectances correspondant à la région du red edge [660 780] ont été retenues. De plus, les canaux susceptibles d'être les plus perturbés par les effets atmosphériques (Tab. II.7) ont été éliminés de la procédure d'inversion. Ces canaux sont ceux influencés par les bandes d'absorption de la vapeur d'eau et de l'oxygène atmosphériques dans la région du red edge. En conséquence, l'inversion a été conduite avec 18 mesures spectrales, pour le mois de mai et 8 mesures spectrales pour le mois de juillet.

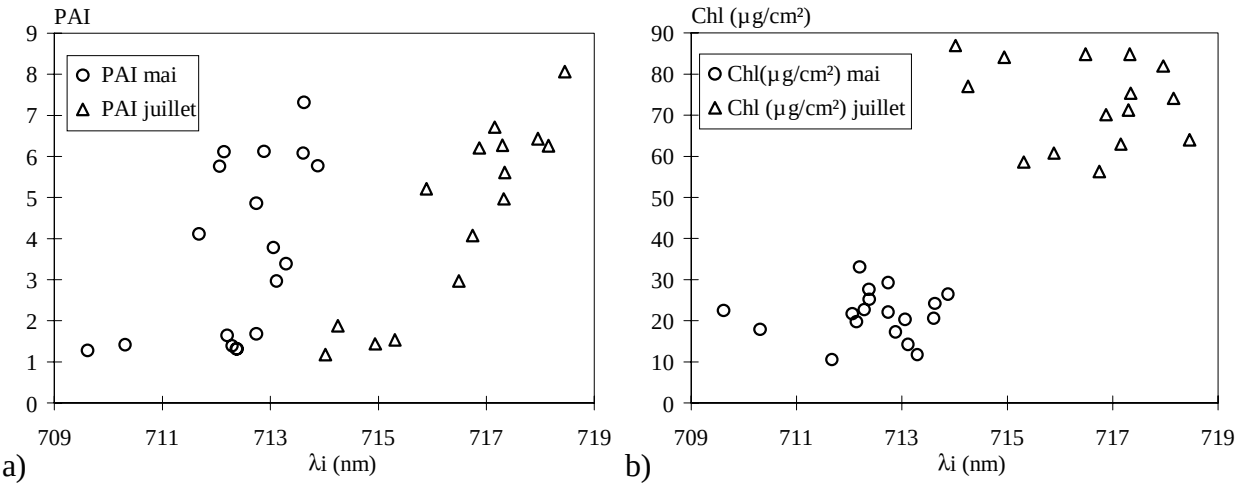
Mai	H_2O : 709, 721, 725, 729 O_2 : 753, 757, 761, 765, 769
Juillet (Nadir et 20°)	O_2 : 753, 757, 761,765

Tableau II.7 : Longueurs d'onde (nm) des bandes d'absorption gazeuse (O_2, H_2O) supprimées des spectres ROSIS pour inverser la relation (1).

La figure II.15 représente λ_i en fonction du PAI, et de la concentration en chlorophylle ($\mu g/cm^2$). Elle illustre l'augmentation de la chlorophylle ($\mu g/cm^2$) et l'absence de variation du PAI de mai à juillet (Tab. II.8). Le PAI et (λ_i) sont corrélés si les mesures de mai et juillet sont considérées séparément (Fig. II.15). Pour une date donnée (λ_i) contient surtout une information sur le PAI. Par contre, l'augmentation de (λ_i) et de la chlorophylle entre le mois de mai et de juillet, alors que le PAI n'a quasiment pas augmenté, illustre le fait que la variation temporelle de (λ_i) est liée à la variation temporelle de la chlorophylle foliaire. (λ_i) semble être donc un bon indicateur de l'évolution de la chlorophylle si l'on considère plusieurs dates.

Ces remarques expliquent que dans notre cas d'étude, (λ_i) est bien corrélé au produit "PAI $\times$ Chl". Ainsi, il existe une forte régression exponentielle (r^2=0.86) entre λ_i et la chlorophylle exprimée en

g/m² (Fig. II.16). Le tableau II.9 illustre la forte similitude des λ_i calculés avec des mesures ROSIS au nadir et à 20°. Pour toutes les parcelles, l'écart entre λ_i estimé à partir des mesures au nadir et à 20°, est inférieur à 0.3nm, à l'exception des semenciers pour lesquels celui-ci est compris entre 1 et 2nm. Ce résultat est intéressant car il montre que malgré la variation significative de la réflectance du couvert avec l'angle zénithal de visée, le (λ_i) quant à lui, montre une faible sensibilité à la direction d'acquisition des mesures, du moins, dans ce cas d'étude.



a) b)

Figure II.15 : λ_i en fonction de LAI (a) et de la concentration en chlorophylle exprimée en µg/cm² foliaire (b) et en g/m² (c). Données ROSIS corrigées des effets atmosphériques (Mai + Juillet Nadir et 20° sauf semenciers).

	Mai		Juillet	
Parcelle	λ_i (nm)	Chl(g/m²)	λ_i (nm)	Chl(g/m²)
C04	712.06	1.25	716.87	4.36
C09	712.37	0.36	714.94	1.21
C11	712.74	0.49	714.25	1.45
C20	712.29	0.32	714.02	1.03
CH3	710.31	0.25	715.31	0.90
CH4	713.88	1.53	717.30	4.47
H07	712.74	1.07	715.89	3.17

Tableau II.8 : (λ_i) des parcelles survolées en mai et juillet (nadir).

Formations	Noms parcelles	Chl (g/m²)	λ_i (Nadir, nm)	λ_i (20°, nm)
Futaie	C_{08}	4.22	717.32	716.70
Futaie	C_{19}	4.23	717.34	717.54
Futaie	H_{09}	2.30	716.74	716.41
Gaulis	C_{18}	4.64	718.15	717.93
Gaulis	H_{08}	5.27	717.95	717.70
Perchis	H_{13}	5.16	718.45	718.36
Semencier	C_{11}	1.45	714.25	715.85
Semencier	C_{20}	1.03	714.02	715.01

Tableau II.9 : (λ_i) des parcelles survolées en juillet nadir et 20°.

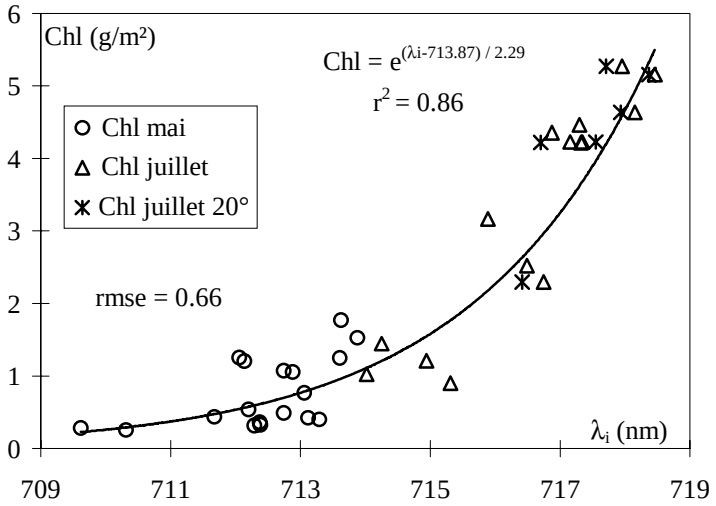


Figure II.16 : (λ_i) en fonction de la concentration en chlorophylle exprimée en (g/m² de sol). Données ROSIS corrigées des effets atmosphériques (Mai + Juillet Nadir et 20° sauf semenciers).

Cette étude a donc permis d'obtenir une relation de régression entre (λ_i) et la concentration en chlorophylle (g/m² de sol). La validité de cette relation doit être considérée avec beaucoup de prudence. Quelques questions importantes sont abordées ci-dessous. Quelle est la robustesse de cette relation au nombre de bandes spectrales utilisées, aux effets atmosphériques? Quel est le nombre de bandes spectrales nécessaires? Quels sont les effets du bruit expérimental et de l'atmosphère?

• <u>Précision nécessaire sur (λ_i)</u>

La relation de régression Chl(λ_i) indiquée dans la figure II.16 montre qu'en première approximation, une variation $\Delta\lambda_i$ = 1nm correspond à une variation ΔChl<20µg/cm². En fait, les

résultats montrent que ΔChl oscille entre 10 et 20 µg/cm² selon le PAI des parcelles. Compte tenu de la dynamique de la concentration en chlorophylle des parcelles (≈10-90µg/cm²), la précision sur Chl doit être de l'ordre de 10µg/cm² pour pouvoir distinguer une dizaine de classes de concentration. La précision requise pour (λ_i) est alors de l'ordre de 0.5nm.

• Robustesse de (λ_i) au nombre de bandes spectrales

En mai, les 18 bandes spectrales disponibles couvrent l'ensemble de la région du red-edge. Sous réserve de problèmes d'étalonnage, elles constituent donc le cas de figure idéal pour déterminer le point d'inflexion de spectres de couverts. L'erreur commise sur (λ_i) est donc supposée nulle dans ce cas. En fait, seules des simulations peuvent permettre de valider cette hypothèse. Quelle est l'erreur commise sur (λ_i) quand ce dernier est estimé avec un nombre moins élevé de bandes spectrales? Ce problème est important pour la définition des capteurs embarqués. Dans notre étude, une réponse est apportée pour le cas particulier où le nombre de canaux disponibles passe de 18 à 8, de manière à pouvoir comparer les résultats de mai et de juillet. Pour cela, les données ROSIS de mai ont été inversées en utilisant uniquement les 8 canaux les plus proches de ceux disponibles en juillet (Tab. II.10). Les valeurs de (λ_i) calculées avec N=18 bandes ont servi de référence. Avec N=8 bandes, l'erreur minimale commise sur le (λ_i) des parcelles varie entre 0.002 nm et 0.5 nm avec une moyenne égale à 0.15nm. Ce nombre de bandes fournit donc une précision sur la chlorophylle plus faible que celle indiquée ci-dessus (≈10µg/cm²).

(1): λ de mai (18)	669 - 673 - 677 - 681 - 685 - 693 - 697 - 701-705 - 713- 717- 733 - 737 - 741 - 745 - 749 - 773- 777
(2): λ de juillet (8)	673 - 677 - 681 - 705 - 717- 737 - 745 - 793
(3): λ de mai pour simuler juillet (8)	673 - 677 - 681 - 705 - 717- 737 - 745 - 801

Tableau II.10 : Longueurs d'ondes (λ) utilisées pour l'inversion en mai (1) et en juillet (2). (3): λ de mai utilisées pour simuler les spectres de juillet.

Nous avons ensuite recherché l'erreur maximale commise sur (λ_i) et donc sur la chlorophylle, en utilisant uniquement quatre longueurs d'onde dans la région du red edge. Ce nombre est en fait le nombre minimal de bandes spectrales nécessaires pour l'inversion. Pour chaque parcelle, toutes les combinaisons de 4 longueurs d'onde parmi les 18 longueurs d'onde ont été utilisées pour calculer (λ_i). Seules les combinaisons optimales ont été retenues. Le terme optimal correspond à une erreur $\Delta\lambda_i$ <0.2nm et à une minimisation de l'erreur quadratique moyenne (rmse) calculée sur l'ensemble

des 18 réflectances. Il s'avère que les meilleures combinaisons optimales diffèrent selon les parcelles. La meilleure combinaison (*i.e.* 677, 705, 741 et 749 nm) pour l'ensemble des 34 parcelles donne un $\Delta\lambda_i \in$ [0.167 nm et 1.05 nm] avec une moyenne de 0.65 nm, ce qui correspond à un $\Delta Chl \approx 20\ \mu g/cm^2$. Cette erreur est assez importante compte tenu de la gamme de variation de la concentration en chlorophylle ($\approx$10-90$\mu g/cm^2$). D'autres combinaisons de 4 longueurs d'ondes donnent des erreurs à peine supérieures. L'histogramme de la figure II.17 indique la fréquence d'apparition de chaque longueur d'onde dans les combinaisons optimales de 4 longueurs d'onde, pour chaque parcelle. Il illustre le fait qu'aucune longueur d'onde ne semble pouvoir être a priori rejetée ou acceptée et explique l'existence de plusieurs combinaisons optimales pour l'inversion. En fait, toute combinaison optimale comprend la longueur d'onde de la réflectance minimale du spectre, la longueur d'onde de la réflectance maximale et deux longueurs d'onde réparties de manière régulière sur la pente R(λ) située dans la zone de red edge. Ce résultat était prévisible.

L'intérêt de ce travail est d'avoir montré qu'un jeu de 8 bandes spectrales permet de déterminer la chlorophylle avec une précision inférieure à $10\mu g.cm^{-2}$. La généralisation de ce résultat à la fois à d'autres dates et d'autres sites requiert de nouvelles expériences. La modélisation est cependant susceptible d'apporter quelques réponses.

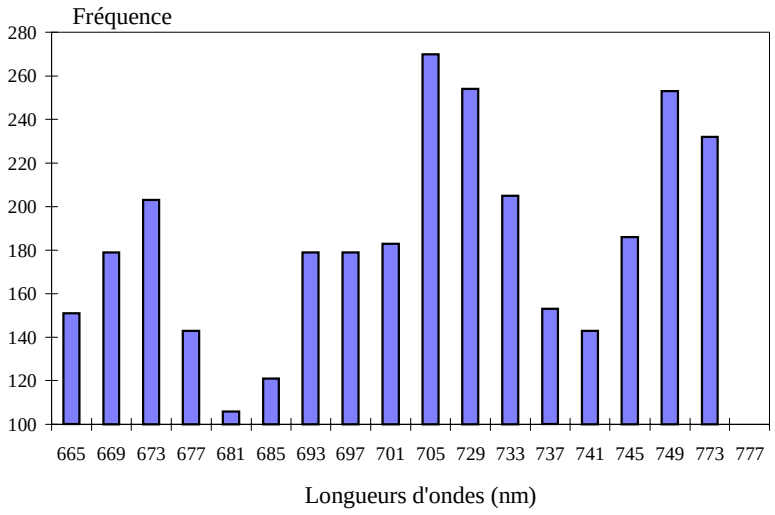


Figure II.17 : Fréquence d'apparition des bandes spectrales sélectionnées pour l'inversion dans le cas de combinaisons de 4 bandes parmi 18.

• Robustesse de (λ_i) au bruit

La robustesse de (λ_i) au bruit de la mesure a été testée en introduisant un bruit sur les réflectances R(λ) utilisées pour réaliser l'inversion. Ainsi, il a été ajouté aux réflectances un bruit multiplicatif

x(λ).X.R(λ), où x(λ) est un nombre aléatoire compris entre -1 et 1 et X varie de 0 à 10%. Les résultats obtenus pour une parcelle sont indiqués dans le tableau II.11. Il apparaît qu'un seuil relativement élevé égal à 5% implique $\Delta\lambda_i$ <0.2nm. La détermination du (λ_i) apparaît donc être robuste par rapport au bruit sur la mesure. Ce résultat très encourageant, est cependant uniquement indicatif. Lors d'une étude réaliste, il faut en effet prendre en considération la forme et l'intensité réelle du bruit, non connu avec ROSIS (*e.g.* bruit additif constant et combiné à un bruit gaussien).

X	0%	0.1%	0.5%	1%	5%	10%
λ_i	713.12	713.07	713.06	713.15	712.95	711.47

Tableau II.11 : Influence du niveau d'erreur (X) sur la mesure R(λ), pour le calcul de (λ_i). X=0% fournit la valeur de référence.

• Robustesse de (λ_i) aux effets atmosphériques

La sensibilité de (λ_i) aux effets atmosphériques a été testée par inversion des spectres non corrigés des effets atmosphériques, après élimination des bandes d'absorptions de O_2 et H_2O. Les (λ_i) calculés ont été comparés à ceux obtenus après correction atmosphérique. Pour les parcelles de perchis/gaulis et les futaies, l'écart $\Delta\lambda_i$ est toujours inférieur à 0.2nm, avec une erreur moyenne de 0.13nm. Par contre, pour les parcelles plus hétérogènes, *i.e.* les semenciers, l'erreur $\Delta\lambda_i$ maximale est 0.7nm, avec une valeur moyenne de 0.3nm. A l'exception des parcelles très ouvertes, pour lesquelles la mesure de télédétection est évidemment beaucoup moins reliée au couvert arboré, le terme (λ_i) est donc très robuste aux effets atmosphériques. Ce résultat est conforme à celui obtenu par Jacquemoud (1992) dans le cas de couverts homogènes.

Ces résultats illustrent la robustesse de (λ_i) au bruit instrumental et aux effets atmosphériques. De plus, ils montrent l'intérêt d'une approche basée sur l'utilisation d'un nombre assez élevé de canaux pour évaluer la chlorophylle. Un minimum de 8 canaux fournit une précision inférieure à 10µg/cm² sur la chlorophylle. Ce résultat a cependant été obtenu avec les moyennes de parcelles. L'utilisation de spectres de pixels et non de parcelles donne en général de moins bons résultats. Il peut être alors nécessaire d'envisager d'autres méthodes; *e.g.*, régressions spectrales (Jacquemoud, 92), ou recherche de (λ_i) à partir de la réflectance spectrale d'éléments de paysage différentiés par classification des images spectrométriques. D'autres questions restent encore en suspend: quelle est

la sensibilité des relations obtenues au LAI, aux propriétés optiques foliaires etc.? Ce problème est abordé de façon préliminaire dans le chapitre suivant à l'aide du modèle DART.

V CONCLUSION PARTIELLE

Le potentiel de mesures spectrométriques de télédétection pour évaluer le PAI et surtout la chlorophylle d'une forêt tempérée a été étudié. L'emploi de bandes spectrales fines n'améliore pas la détermination du PAI, par rapport à l'utilisation de bandes spectrales larges conformément aux résultats de Elvidge et Chen (1995). D'autres résultats classiques ont été mis en évidence. Ainsi, les canaux spectraux les plus appropriés pour calculer le PAI sont les canaux rouge et proche infrarouge. Les régressions obtenues à partir des indices ROSIS et SPOT sont sensibles aux effets atmosphériques ainsi qu'aux directions de visée. Les très larges intervalles de confiance associés aux coefficients de corrélation de ces régressions nous ont permis uniquement de vérifier, sur notre site d'étude, des tendances déjà connues par ailleurs.

La classification de l'image SPOT et des simulations DART de futaies, perchis et semenciers ont mis en évidence le fort impact de la structure du couvert sur sa réflectance. Son influence est souvent plus forte que celle du PAI. Elle est essentiellement expliquée par la différence des effets d'ombre entre les perchis, futaies et semenciers. Ces résultats tendent à démontrer la nécessité d'une stratification du couvert en classes structurales si l'on souhaite réaliser une cartographie fiable du PAI à l'aide de régressions. Une telle stratification sera en fait très utile pour étudier à la fois la distribution spatiale et l'évolution temporelle du PAI.

La détermination de la chlorophylle, à partir du point d'inflexion λ_i, a conduit à des résultats très intéressants. Ce dernier semble bien relié (r^2=0.87) à la concentration en chlorophylle foliaire ($\mu g/cm^2$) dans la mesure où cette dernière est pondérée par le PAI. L'utilisation de 8 canaux spectraux dans la région du red edge s'est avérée suffisante pour atteindre une précision inférieure à $10 \mu g/cm^2$ sur la chlorophylle foliaire. En fait, cette précision dépend du PAI, car λ_i est un paramètre qui intègre à la fois la chlorophylle foliaire et le PAI. Une autre caractéristique intéressante du paramètre λ_i est d'être apparue comme peu sensible aux effets atmosphériques ($\Delta\lambda_i$<0.2nm pour les futaies et perchis), au bruit instrumental (i.e., un bruit additif de 5% induit $\Delta\lambda_i$<0.2nm) et aux conditions de visée (i.e., $\Delta\lambda_i$<0.3nm pour les futaies et perchis).

Bien évidemment, les résultats indiqués ci-dessus doivent être validés par de nouvelles campagnes de mesures et complétés par l'utilisation de modèles qui prennent bien en compte la structure des couverts forestiers. L'aspect modélisation est abordé dans le chapitre suivant dans lequel sont présentés les premiers résultats de l'étude de la sensibilité du BRF et du λ_i aux LAI et conditions d'illumination et de visée.

CHAPITRE III

Modélisation de l'évolution de spectres de couverts en fonction de la chlorophylle

I INTRODUCTION

Plusieurs discussions nous ont déjà permis de montrer l'intérêt de la modélisation du transfert radiatif pour mieux comprendre, et donc utiliser, les mesures de télédétection. Dans ce chapitre, l'objectif a été d'évaluer l'apport du modèle DART. Ainsi, la modélisation permet-elle de retrouver les résultats obtenus lors de l'étude empirique (cf. Chap. II), en particulier ceux concernant la détermination de la chlorophylle à partir du point d'inflexion (λ_i) ? Est-il possible de calculer la précision des résultats empiriques ? Peut-on évaluer leur robustesse ? Le point d'inflexion (λ_i) est-il indépendant de la direction d'observation comme le laissent supposer les résultats obtenus avec ROSIS ? De manière plus générale, est-ce que la modélisation permet de mieux cerner le potentiel de la télédétection spectrométrique pour l'étude de la végétation ?

Les réponses à ces questions ne sont pas triviales, en particulier en raison du nombre important de causes possibles de différences entre les mesures de télédétection et leurs simulations. Certaines causes ont déjà été mentionnées auparavant. Il s'agit à la fois des incertitudes concernant les mesures de télédétection, les corrections de ces mesures et les mesures de terrain utilisées comme paramètres d'entrée des modèles de transfert radiatif. De plus, tout modèle, et le modèle DART ne fait pas exception, repose sur des approximations des équations du transfert radiatif (cf. Chap. I) qui peuvent être sources d'erreurs. Finalement, il convient d'insister sur une autre cause de différence : le mode de représentation du paysage. Un modèle de transfert radiatif, aussi exact soit-il quant à la modélisation du rayonnement, ne peut simuler précisément la réflectance du couvert, du moins pour toute configuration expérimentale, s'il utilise une représentation incorrecte du milieu étudié. Une telle inexactitude peut provenir de l'approche mathématique utilisée pour simuler le milieu et/ou d'une connaissance trop imprécise du milieu. Une souplesse intéressante du modèle DART est de pouvoir utiliser une large gamme de modes de représentation du paysage. Ces modes vont de la simple représentation du milieu par une couche homogène turbide comme pour le modèle SAIL à une représentation extrêmement réaliste où la position et dimensions des arbres sont connues à priori. Ce degré de liberté laissé à l'utilisateur peut évidemment être une source d'incertitude s'il est mal utilisé (cf. Chap. I) mais il est généralement indispensable pour obtenir des simulations réalistes. Nous avons moins de liberté quant à la construction du paysage avec un modèle comme SAIL, ce qui constitue une de ses forces (*i.e.*, simplicité d'utilisation) et faiblesses (*i.e.*, résultats parfois très imprécis).

La détermination de la concentration en chlorophylle (Chl) d'un couvert à partir de mesures de réflectances R(λ) du couvert est très dépendante de la sensibilité de R(λ) à Chl. La possibilité d'évaluer précisément les variations spatiales et temporelles de la chlorophylle, repose sur l'hypothèse que l'influence de cette dernière sur R(λ) n'est pas masquée par l'influence d'autres paramètres biophysiques ou optiques du couvert. La solution de ce problème n'est à priori pas unique. Elle dépend de nombreux paramètres et facteurs tels que le type de milieu observé (*e.g.*, distribution 3-D des arbres), le stade phénologique du milieu (*e.g.*, LAI) et la configuration expérimentale d'acquisition des mesures de réflectance (*e.g.*, directions d'éclairement et d'observation et bandes spectrales). La détermination de la chlorophylle par une approche théorique requiert donc une analyse comparative de l'influence des paramètres du couvert susceptibles d'influencer sa réflectance. Ce chapitre présente une étude préliminaire réalisée dans ce but. Il comprend trois parties :

- utilisation de la modélisation pour mieux comprendre la sensibilité des mesures ROSIS obtenues, ou qui auraient pu être obtenues dans d'autres configurations.
- analyse comparative des réflectances DART et des mesures ROSIS et SPOT.
- étude par modélisation de la sensibilité du point d'inflexion (λ_i) à la chlorophylle et à plusieurs paramètres du couvert, et comparaison avec les points (λ_i) obtenus avec ROSIS. La volonté d'utiliser le modèle DART dans un cas concret déjà étudié avec les données ROSIS nous a conduit à débuter ce travail avec l'étude du comportement du point d'inflexion (λ_i) d'un perchis de hêtre.

II. ETUDE DE SENSIBILITÉ DE LA RÉFLECTANCE DU COUVERT

La sensibilité de la réflectance du couvert à deux paramètres biophysiques du couvert (LAI, ω_f) et à deux paramètres expérimentaux (θ_s, θ_v) a été étudiée. Les résultats présentés ici ont été simulés avec une configuration d'éclairement (θ_s = 30°) qui correspond à celle observée lors de l'acquisition des mesures ROSIS. Les paramètres d'entrée utilisés par le modèle DART sont résumés dans le tableau II.4 (caractéristiques structurales mesurées sur le terrain par le LEV) et le tableau III.1 (propriétés optiques, SKYL, etc.).

	Visible	Proche infrarouge
$\omega_{f,lamb}$	5% - 30% - 50%	90%
$\omega_{f,spe}$	3%	3%
ρ_{und}	4%	30%
LAI	0.5 à 8.5 ΔLAI=1	0.5 à 8.5 ΔLAI=1
LAD	Planophile	Planophile
θ_s	0° - 30° - 60°	0° - 30° - 60°
SKYL (θ_s=0°)	23%	15%
SKYL (θ_s=30°)	26%	17%
SKYL (θ_s=60°)	38%	25%

Tableau III.1 : Paramètres optiques correspondant aux simulations DART de la figure III.1.

La figure III.1 illustre la variation du FRD d'un perchis de hêtres pour des LAI compris entre 0.5 et 8.5 avec un pas égal à 1. Quatre configurations spectrales sont considérées. Ainsi, l'albédo foliaire $\omega_{f,lamb}$ des diffusions non spéculaires vaut 0.05, 0.3, 0.5 et 0.9. L'albédo foliaire $\omega_{f,spe}$ des diffusions spéculaires est supposé égal à 0.03 sur l'ensemble du domaine spectral. Les autres caractéristiques (*i.e.*, albédo hémisphérique du sous bois et SKYL) sont indiquées dans le tableau III.1. La figure III.2 montre les FRD du couvert simulés dans les mêmes conditions par le modèle SAIL. Les FRD DART et SAIL ont été comparés uniquement dans le plan perpendiculaire. En effet, le modèle SAIL ne simule pas la réflexion spéculaire et simule différemment du modèle DART, la rétrodiffusion, *i.e.* deux mécanismes qui surviennent surtout dans le plan principal. La comparaison des FRD DART et SAIL a pour but de mettre en évidence l'influence de la structure du couvert. Cette influence est manifeste quand les FRD DART et SAIL varient différemment avec le LAI.

L'évolution des FRD DART et SAIL en fonction du LAI, sont indiquées ci-dessous. D'une manière générale, les FRD SAIL sont supérieurs aux FRD DART. Cette tendance s'accentue si le LAI croît. De plus, la variation des FRD SAIL est monotone avec le LAI alors que la variation des FRD DART peut être monotone ou non selon $\omega_{f,lamb}$. Ainsi dans le PIR, une augmentation de la réflectance induit une augmentation de la réflectance SAIL alors que la réflectance DART

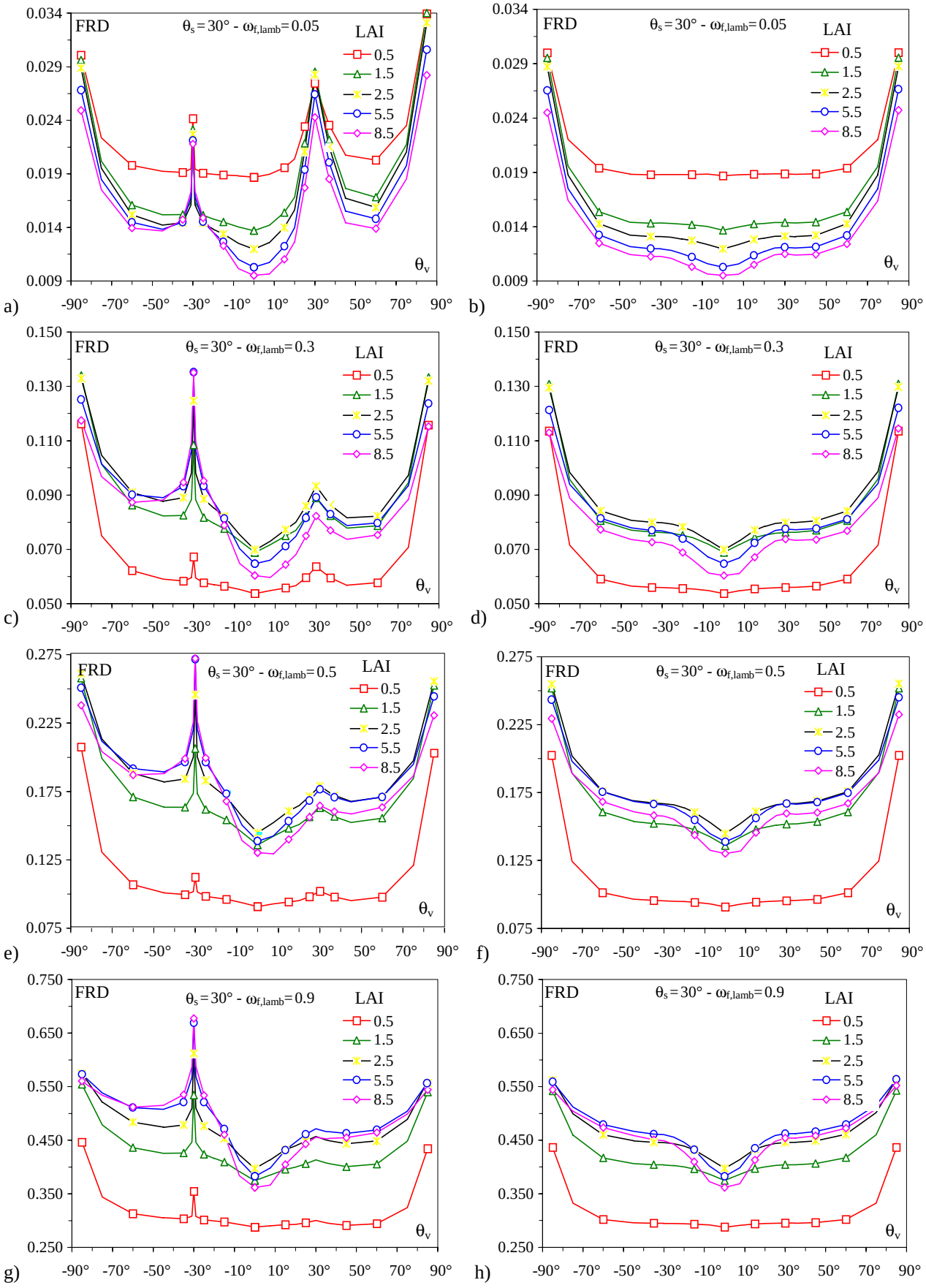


Figure III.1 : FRD DART d'un perchis de hêtres *vs.* le LAI. Plan principal (gauche) et perpendiculaire (droite). a,b) $\omega_{f,lamb}$=0.05. c,d) $\omega_{f,lamb}$=0.3. e,f) $\omega_{f,lamb}$=0.5. g,h) $\omega_{f,lamb}$=0.9. Paramètres du couvert dans Tab. III.2.

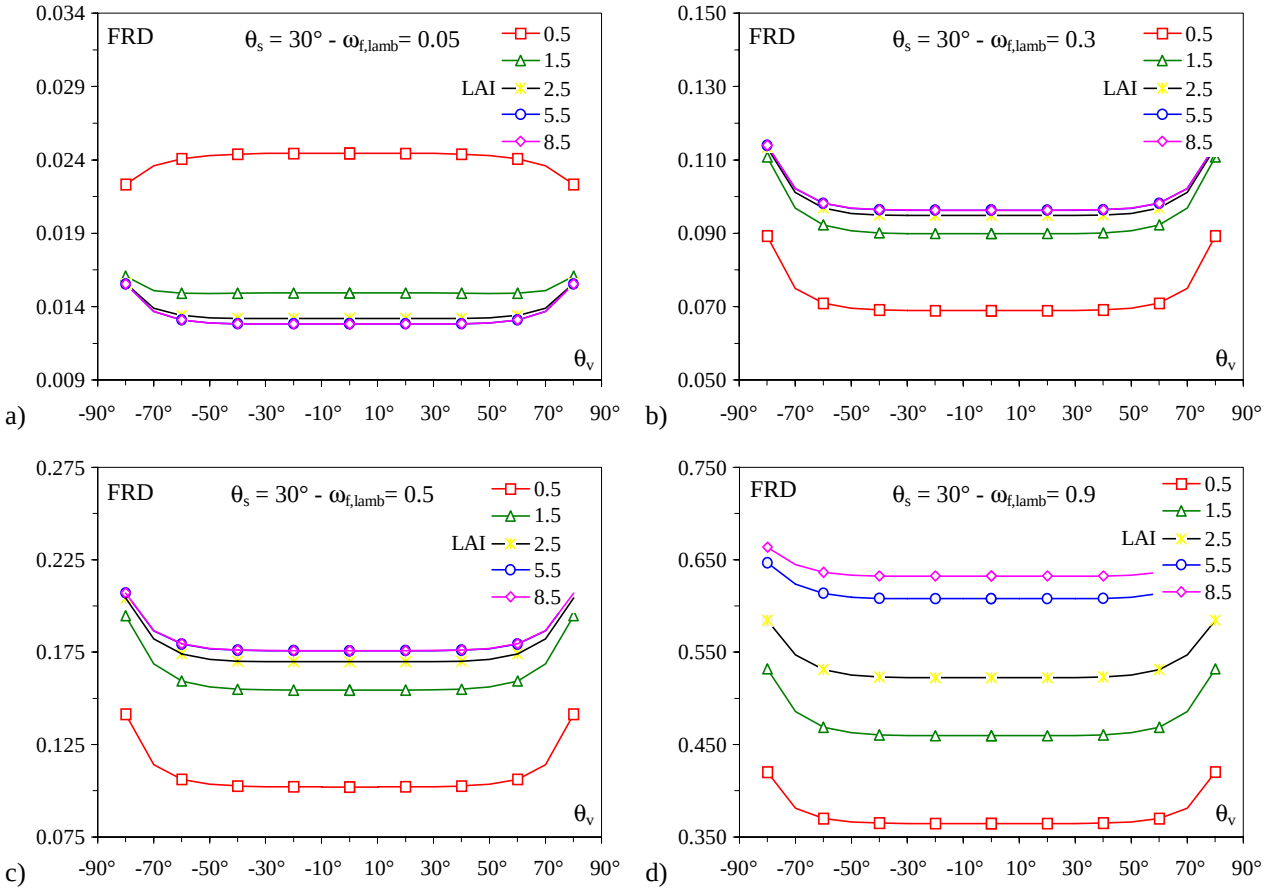


Figure III.2 : FRD SAIL d'un perchis de hêtres selon le LAI. Plan perpendiculaire solaire. a) $\omega_{f,lamb}$=0.05. b) $\omega_{f,lamb}$=0.3. c) $\omega_{f,lamb}$=0.5. d) $\omega_{f,lamb}$=0.9. Les paramètres du couvert sont dans le tableau III.2.

augmente jusqu'à un certain seuil puis diminue ensuite. Cette différence de comportement est expliquée la prise en compte de la structure dans le modèle DART. En effet, l'accroissement du LAI induit des effets antagonistes sur la réflectance du couvert simulée avec DART. Ainsi, une augmentation du LAI augmente la contribution des houppiers éclairés mais diminue la contribution des houppiers et du sous bois à l'ombre, car les zones à l'ombre s'assombrissent. De manière simplifiée on peut dire que la réflectance DART va résulter des contributions relatives des éléments du couverts qui selon les situations, seront plus ou moins éclairés. Ces effets ne peuvent être simulés avec SAIL.

- *Isotropie des FRD*

Les FRD SAIL sont beaucoup plus isotropes que les FRD DART. Ainsi, pour toute direction de réflexion $\theta_v \in [-60° +60°]$ les FRD SAIL sont constants, en raison de la quasi constance de la section efficace foliaire, alors que les FRD DART ont un minimum pour la direction verticale

(θ_v=0°). Ce minimum tend à être d'autant plus prononcé que le LAI est élevé. Cette variation est expliquée par l'augmentation des ombres portées sur le sol, en raison de l'accroissement de l'opacité des houppiers, sachant que la verticale est la direction pour laquelle les ombres sont les mieux perçues. La structure du couvert induit donc une anisotropie de la réflectance au voisinage du nadir. Cet aspect est important, car les mesures satellitales sont essentiellement effectuées autour de cette direction. La réflectance au nadir est bien évidemment aussi influencée par la réflectance du sous bois. En présence de sous bois de réflectance très élevée, la réflectance serait maximale au nadir pour les faibles LAI et décroîtrait avec le LAI pour donner un minimum aux forts LAI.

Un effet apparemment différent survient pour $|\theta_v|>60°$: les FRD DART et SAIL augmentent beaucoup, car la section efficace foliaire tend à augmenter comme LAI/cosθ_v pour $|\theta_v|>60°$, alors qu'elle est presque constante (≈LAI) pour $|\theta_v|<60°$. Les normales foliaires associées à un LAD planophile ne sont en effet pas toutes orientées selon la verticale. L'angle zénithal foliaire moyen est proche de 26°. La structure du couvert permet d'expliquer que lorsque $|\theta_v|$ augmente les FRD DART croissent plus vite que les FRD SAIL. Ils deviennent même supérieurs pour $|\theta_v|>70°$. Cette différence de comportement provient de l'hypothèse très simplificatrice du modèle SAIL pour représenter le paysage : le paysage est un milieu plan turbide infini. Lorsque $|\theta_v|$ devient important, le rayonnement réfléchi par le couvert provient donc principalement d'une couche ΔH qui devient de plus en plus fine par rapport à la hauteur du couvert qui contribue réellement à la réflectance. La transmittance de cette couche est nettement sous estimée par rapport à la réalité. Ainsi, un rayonnement diffusé par un élément de cette couche sera très atténué par les éléments foliaires voisins de cette couche avant de sortir du couvert. Le modèle DART prend automatiquement mieux en compte la propagation réelle du rayonnement. Il convient cependant de garder à l'esprit que les directions avec $|\theta_v|$ élevé jouent un rôle négligeable pour les mesures de télédétection et pour le bilan énergétique du couvert, car l'énergie mise en jeu est très faible. Elle tend à varier comme cosθ_v.

- *Rétrodiffusion et réflectance spéculaire*

Dans le plan principal, la réflectance présente deux maxima locaux au voisinage de la direction de rétrodiffusion solaire (θ_v=-30°) de la direction spéculaire (θ_v=+30°). Ils apparaissent pour tout LAI et sont d'autant plus forts que le LAI est élevé. Leur intensité dépend aussi de $\omega_{f,lamb}$.

L'effet spéculaire est du au fait que le LAD foliaire est planophile. De manière évidente, cet effet est d'autant plus prononcé que le rapport $\omega_{f,spe}/\omega_{f,lamb}$ est fort. La constance de $\omega_{f,spe}$ explique que l'effet spéculaire diminue avec l'augmentation de $\omega_{f,lamb}$.

En dehors des tendances générales précédentes les FRD DART et SAIL présentent une variabilité spectrale selon les propriétés optiques des éléments foliaires du couvert, *i.e.* $\omega_{f,lamb}$. Les principales caractéristiques sont brièvement discutées ci-dessous.

- $\omega_{f,lamb} = 0.05$

  L'augmentation du LAI diminue systématiquement les FRD DART et SAIL. Dans l'intervalle $\theta_v \in [-60° +60°]$, les FRD SAIL sont en général supérieurs aux FRD DART. La différence relative $\Delta\rho/\rho$ des FRD DART et SAIL augmente avec le LAI: elle vaut 25% pour LAI=0.5 et 45% pour LAI=8.

Pour les LAI inférieurs à 1, les réflectances SAIL diminuent légèrement pour $|\theta_v| > 50°$, alors qu'elles augmentent pour les LAI > 1. En effet, la section efficace foliaire augmente avec θ_v, ce qui pour LAI<1 diminue la réflectance du couvert, car la contribution du sol décroît avec la diminution de la transmittance du couvert. Par contre, pour LAI>1 l'augmentation de la section efficace foliaire fait que la diffusion du couvert augmente plus vite que ne diminue la contribution du sol.

- $\omega_{f,lamb} = 0.3/0.5/0.9$

  Contrairement au cas "$\omega_{f,lamb} = 0.05$" une augmentation du LAI n'implique pas une diminution des FRD DART et SAIL. Les FRD DART augmentent régulièrement quand le LAI croît jusqu'à une valeur ≈3 (≈4 pour $\omega_{f,lamb} \geq 0.5$) et diminuent ensuite. Ce seuil augmente avec $|\theta_v|$. Par contre, les FRD SAIL croissent de manière monotone avec le LAI. Cette différence de comportement est expliquée comme nous l'avons mentionné plus haut, par la structure du couvert : l'augmentation du LAI rend les houppiers de plus en plus opaques, ce qui diminue leur transmittance. Ceci rend donc les ombres plus sombres, ce qui fait décroître les FRD DART, en particulier au nadir, car les ombres sont les mieux perçues selon cette direction.

La figure III.3 présente les FRD DART dans le plan principal pour le cas LAI=3.5 et pour $\omega_{f,lamb}$=0.05, 0.3, 0.5 et 0.9. L'utilisation d'une échelle unique pour les facteurs de réflectance permet de mieux mettre en évidence les différences absolues entre les FRD spectraux.

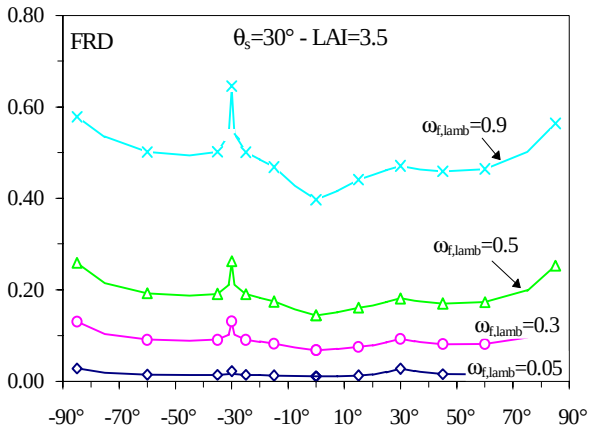


Figure III.3 :

FRD DART d'un perchis de hêtres, dans le plan principal, pour $\omega_{f,lamb}$=0.05, 0.3, 0.5 et 0.9. LAI=3.5.

La figure III.4 montre les variations du NDVI du couvert avec le LAI de 0.5 à 8.5, par pas égaux à 1. Elle illustre un résultat classique : la corrélation positive entre le LAI et le NDVI. Dans le plan principal, les effets "hot spot" et "spéculaire" donnent lieu à deux minima locaux.

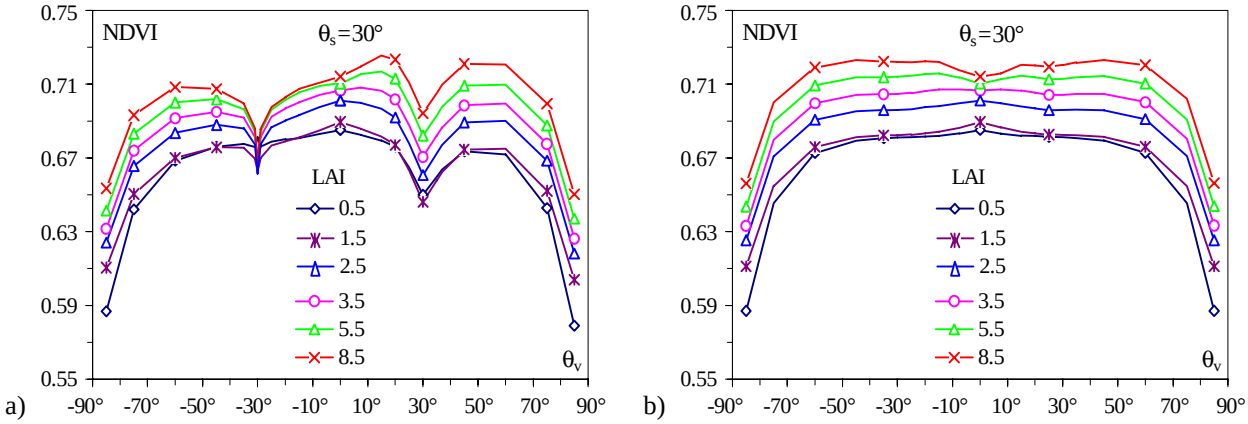


Figure III.4 : NDVI DART d'un perchis de hêtres selon le LAI. Plans solaires principal (gauche) et perpendiculaire (droite). θ_s=30°. LAD planophile.

La figure III.5 représente les FRD DART au sommet de l'atmosphère. Les réflectances correspondent à celles de la figure III.1. Elles ont été simulées à l'aide de paramètres atmosphériques calculés par le modèle atmosphérique 6S à partir du sondage atmosphérique réalisé le jour de l'acquisition des mesures ROSIS et SPOT (cf. Chap. II). Les simulations des

FRD mesurés au sommet de l'atmosphère mettent en évidence le fait qu'au sommet de l'atmosphère les FRD faibles sont augmentés alors que les FRD forts sont diminués, en raison des mécanismes d'interception et de diffusion atmosphérique. Ainsi, au sommet de l'atmosphère, les réflectances ρ_{VIS} ($\omega_{f,lamb}$=0.05 et 0.3) sont systématiquement plus fortes alors que les réflectances ρ_{PIR} ($\omega_{f,lamb}$=0.9) sont systématiquement plus faibles. Il en résulte que les maxima des réflectances ρ_{VIS} selon les directions associés aux phénomènes du "hot spot" et de la diffusion spéculaire sont très atténués au sommet de l'atmosphère.

Les simulations réalisées pour des directions solaires autres que 30° ont mis en évidence l'influence de θ_s sur le FRD, en particulier pour les directions d'observation obliques (Fig. III.6). Cette influence est très forte dans le plan solaire principal (Fig. III.6.a et c). Ainsi, pour θ_s=60°, les réflectances DART deviennent très importantes pour θ_v>50°. Ceci est expliqué par l'importance accrue de la diffusion spéculaire selon la direction solaire avant.

Par contre, dans le plan perpendiculaire, l'influence de la direction solaire est relativement faible (Fig. III.6.b et d) si θ_s>25°. En effet, elle survient principalement pour $\theta_s \in [0°\ \ 25°]$, c'est à dire pour des angles solaires irréalisables pour la forêt de Fontainebleau. Des tendances similaires sont observées pour le NDVI, c'est à dire une très forte variabilité dans le plan principal (Fig. III.6.e) et une faible variabilité dans le plan perpendiculaire (Fig. III.6.f).

Cette étude a permis d'illustrer et d'expliquer les principales caractéristiques du comportement des FRD de couverts forestiers en fonction du LAI, θ_v, θ_s, ω_f et de l'atmosphère. Le caractère très anisotrope des FRD est dû essentiellement à la structure du couvert et à l'atmosphère. Nous avons pu constater que dans notre cas d'étude la direction zénithale solaire n'a que peu d'influence sur le FRD d'un perchis de hêtre.

Dans une deuxième étape, le travail a été poursuivi avec la comparaison de résultats de simulations DART et des mesures ROSIS et SPOT, à la fois pour les réflectances et pour l'estimation de la chlorophylle à partir du λ_i.

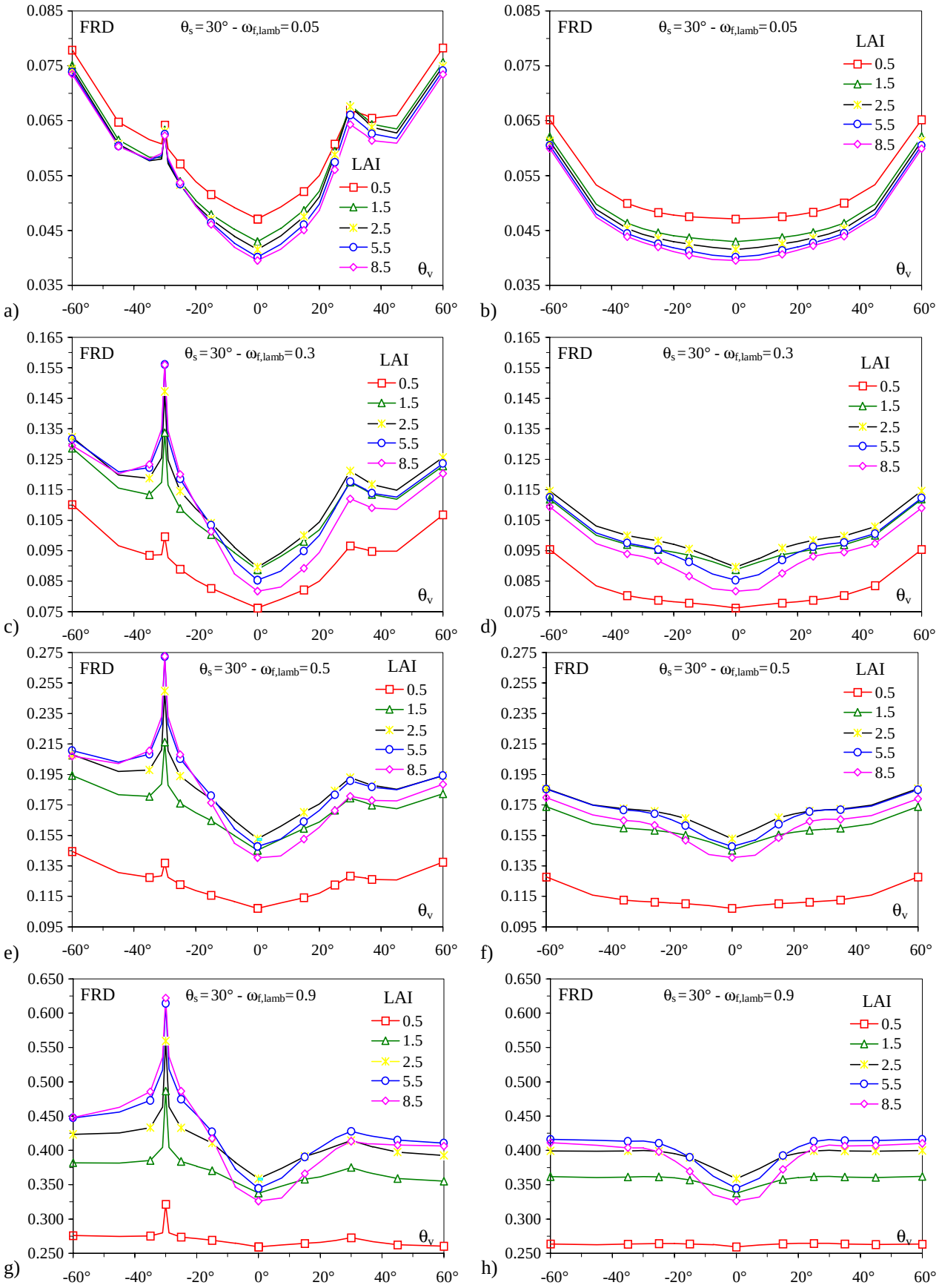


Figure III.5 : FRD DART d'un perchis de hêtres selon le LAI, au sommet de l'atmosphère. Plans principal (gauche) et perpendiculaire (droite). a,b) $\omega_{f,lamb}$=0.05. c,d) $\omega_{f,lamb}$=0.3. e,f) $\omega_{f,lamb}$=0.5. g,h) $\omega_{f,lamb}$=0.9. Les paramètres du couvert figurent dans le tableau III.2.

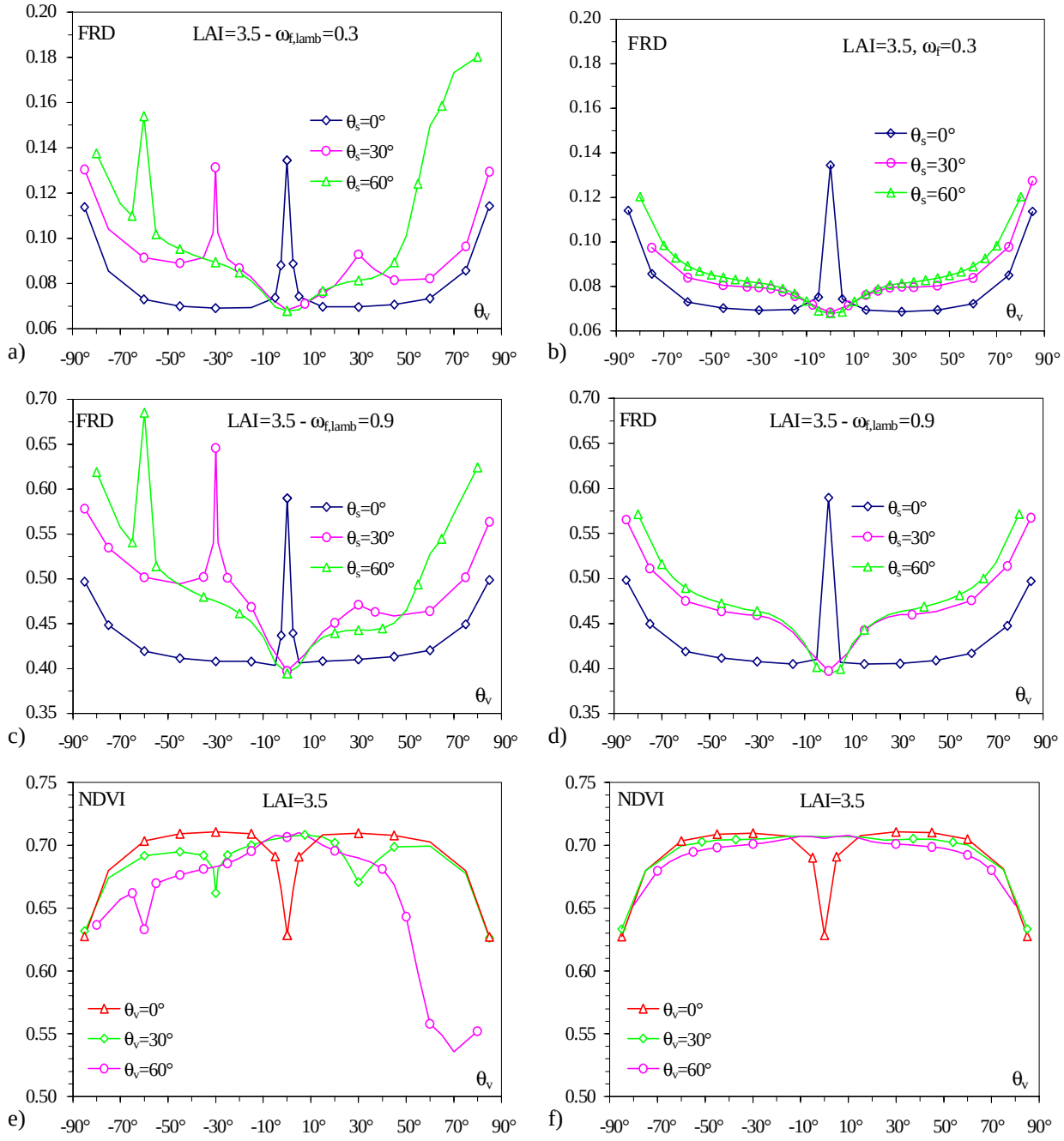


Figure III.6 : Simulations DART d'un perchis de hêtres selon l'angle zénithal solaire (θ_s=0°, 30° et 60°). Plans principal (gauche) et perpendiculaire (droite). a,b) FRD avec $\omega_{f,lamb}$=0.3. c,d) FRD avec $\omega_{f,lamb}$=0.9. e,f) NDVI. LAI=3.5. Les paramètres du couvert sont indiqués dans le tableau III.2.

III SIMULATIONS DE SPECTRES DE COUVERTS

L'utilisation de la modélisation pour étudier la précision de la chlorophylle obtenue empiriquement à partir du point (λ_i), et pour analyser la robustesse de la relation "λ_i-Chl", requiert la simulation de spectres de couvert. De manière évidente, la nécessité d'analyser un

grand nombre de spectres est une contrainte très sérieuse. Ainsi, la simulation d'un seul spectre couvrant la gamme [400nm 2400nm] avec une résolution de 2nm nécessite 1000 simulations DART. Un premier travail a donc consisté à développer une approche qui permette la simulation d'un nombre quelconque de spectres de couvert à partir d'un nombre restreint de simulations DART. La méthode utilisée est décrite ci-dessous. Elle repose sur l'utilisation d'interpolations linéaires combinées à des fonctions discrètes qui assurent la correspondance entre les propriétés optiques des éléments du couvert, un paramètre biophysique tel que la chlorophylle et la longueur d'onde. Cette méthode permet de calculer un spectre de couvert pour tout LAI, pour toute concentration en chlorophylle, etc. à partir d'un ensemble très limité de simulations DART pré-calculées. Ce travail a été débuté sur des perchis de hêtres.

III.1 Méthodologie

L'objectif est de simuler avec DART des spectres de couverts $R(\lambda)$ pour différents paramètres : Chl, LAI, et directions d'observation. Or, toute réflectance de couvert, à une longueur d'onde donnée (λ), dépend des propriétés optiques foliaires qui elles mêmes dépendent de la concentration foliaire en chlorophylle. Il est donc nécessaire de connaître les propriétés optiques foliaires (ρ_f,τ_f) à toute longueur d'onde (λ) et pour n'importe quelle concentration en chlorophylle souhaitée. Nous avons pour cela utilisé le modèle PROSPECT. Celui-ci simule les spectres de feuilles en fonction de la concentration en chlorophylle foliaire et du paramètre non mesurable N qui décrit la structure interne du mésophylle (Jacquemoud, 1992). Les simulations PROSPECT permettent donc d'obtenir un ensemble de propriétés optiques foliaires utilisées en tant que paramètres d'entrée de DART. La méthode développée pour simuler les spectres de couvert est décrite ci-dessous.

• Interpolation linéaire de spectres DART

La principale contrainte associée à la simulation de spectres de couvert est le nombre de simulations. Ainsi, pour réaliser N spectres comprenant 1000 intervalles spectraux, il convient d'effectuer 1000×N simulations. Une méthode de calcul, basée sur une approche indirecte, a été développée. Elle a pour origine les deux constatations suivantes :

- les réflectances d'un couvert à deux longueurs d'onde sont égales si les propriétés optiques du milieu et de son environnement sont identiques à ces deux longueurs d'onde. Cette simple

remarque signifie qu'il n'est pas nécessaire d'effectuer deux simulations, mais une seule. Il convient donc de raisonner en terme de propriétés optiques, indépendamment des longueurs d'ondes.

- la connaissance de N réflectances DART d'un couvert pour N jeux de paramètres optiques et structuraux permet d'obtenir, par interpolation linéaire sur ces N jeux, la réflectance pour tout jeu de paramètres dont les valeurs sont encadrées par celles des paramètres utilisés pour constituer les N jeux.

Cette méthode est décrite de manière schématique dans la figure III.7. Pour notre étude, l'interpolation a été effectuée sur un ensemble de réflectances de couvert $R(\lambda)$ simulées à partir de N jeux de paramètres d'entrée, *i.e*, les propriétés optiques foliaires (ρ_f,τ_f), le LAI de la canopée et la réflectance du sous-bois ρ_{und}. Bien évidemment cette méthode peut être généralisée par interpolation sur des réflectances qui seraient fonction des paramètres cités ci-dessus mais également d'autres paramètres comme le SKYL, la réflectance du sol, etc.

Nous voulons donc obtenir des spectres de couvert $R(\rho_{f,j},\tau_{f,j},LAI,\rho_{und,n},\lambda)$ pour n'importe quel triplet $\{(Chl,N),LAI,\rho_{und}\}$. A tout couple (Chl,N) correspond un spectre $(\rho_f(\lambda),\tau_f(\lambda))$. L'approche développée a consisté à calculer un ensemble de réflectances DART $R((\rho_{f,j},\tau_{f,j}),LAI_k,\rho_{und,n},\lambda)$ tel que les couples $(\rho_{f,j},\tau_{f,j})$, les réflectances du sous-bois $(\rho_{und,n})$ et les LAI_k, échantillonnent de manière régulière l'espace $\{\rho_f,\tau_f,LAI,\rho_{und}\}$. Le LAI a été échantillonné en divisant la dynamique totale du LAI en K intervalles égaux. L'échantillonnage des ρ_{und} a été réalisé sur des spectres de sous-bois simulés avec le modèle SAIL à partir de valeurs extrêmes pour les propriétés optiques de ses éléments foliaires et du sol. N valeurs ρ_{und} régulièrement distribuées entre les réflectances simulées minimales et maximales ont été sélectionnées. L'échantillonnage de l'espace (ρ_f,τ_f), pour l'ensemble du spectre [400-2400nm] a été effectué de la manière suivante:

• Constitution de la base $\{\rho_f,\tau_f\}$

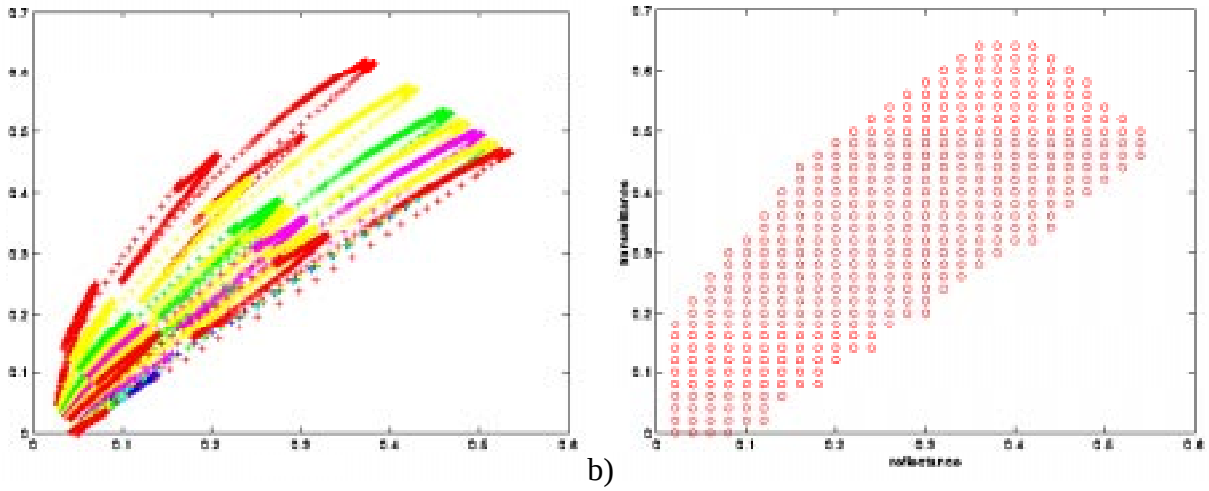
Pour obtenir cette base, l'algorithme suivant à été appliqué sur les spectres PROSPECT, sur le domaine spectral [400-2400nm] :

1- Simulation de I spectres PROSPECT couvrant la dynamique des concentrations en chlorophylle. L'échantillonnage de ces I spectres, par pas $\Delta\lambda$=2nm, fournit un ensemble de valeurs (E) contenant tous les couples (ρ_f,τ_f) possibles (Fig. III.8.a).

2- Cet ensemble (E) est ensuite échantillonné (Fig. III.8.b) de manière à se ramener à un ensemble de J couples {ρ_{fj},τ_{fj}} régulièrement distribués. L'approche algorithmique est très simple. Elle est résumée dans la figure III.7. Dans notre cas d'étude, nous avons obtenu J=420.

Il a alors été réalisé J.K.N simulations DART pour les J.K.N triplets (($\rho_{f,j}$,$\tau_{f,j}$),LAI_k,$\rho_{und,n}$) possibles. Cette approche a donc fourni l'ensemble {R($\rho_{f,j}$,$\tau_{f,j}$,LAI_k,$\rho_{und,n}$)}.

Des interpolations linéaires réalisées sur les variables (ρ_f,τ_f), LAI et ρ_{und} permettent alors de calculer la réflectance DART pour tout triplet (($\rho_{f,j}$,$\tau_{f,j}$),LAI_k,$\rho_{und,n}$). La dernière étape consiste à assurer une correspondance entre d'une part le couple (ρ_f,τ_f) et d'autre part le triplet (λ,Chl,N). Cette correspondance est réalisée à partir de spectres PROSPECT. Ainsi, le calcul d'un spectre DART R((Chl,N),LAI,ρ_{und}) est précédé d'une simulation PROSPECT qui fournit les couples (ρ_f(Chl,N,λ), τ_f(Chl,N,λ)). Tout point {Chl,N,LAI,ρ_{und}} est donc encadré par seize points {(ρ_f,τ_f),LAI,ρ_{und}} dont les réflectances DART associées sont déjà calculées. Quatre interpolations linéaires successives fournissent alors la réflectance DART recherchée pour chaque longueur d'onde.



a) b)

Figure III.8 :a) Ensemble (E) de tous les couples (ρ_f,τ_f) simulés par PROSPECT pour Chl∈[5 90µg/cm²] et N∈[1.2 1.7] (Tab III.2). b) Echantillonnage {ρ_f,τ_f} de (E).

III.2 Analyse des résultats

III.2.1 Simulations de spectres

- Spectres PROSPECT

La dynamique des valeurs de concentrations en chlorophylle utilisée pour simuler les spectres PROSPECT a été choisie de manière à encadrer les concentrations minimales et maximales mesurées en laboratoire. Pour les feuilles de hêtres, cette concentration varie de 5 à 50µg/cm² entre avril et septembre. Une dynamique supérieure a été choisie dans le but de rendre l'étude de sensibilité plus générale. En effet, la dynamique associée à l'ensemble des parcelles s'étend de 10 à 90µg/cm². Le paramètre N a été estimé par inversion du modèle PROSPECT sur les spectres de feuilles de hêtres mesurés en laboratoire. Il apparaît que N et la concentration en chlorophylle augmentent simultanément au cours du développement de la feuille (Annexe 4, Fig. 6). Les valeurs des couples (N,Chl) utilisés sont indiquées dans le tableau III.2.

Chl (µg/cm²)	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90
N	1.2	1.2	1.4	1.5	1.6	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7

Tableau III.2 : Valeurs de N et de la chlorophylle (Chl) pour simuler les spectres de couverts.

Les spectres de réflectance et transmittance foliaires (Fig. III.9) utilisés pour construire la base $\{\rho_t\ \tau_f\}$ permettent de reproduire deux tendances bien connues dans la phase de développement des feuilles :

- diminution de la réflectance des feuilles, dans le visible [400-680nm], due à une augmentation de l'absorption spectrale de la chlorophylle dont la concentration augmente dans la feuille au cours du temps. Lorsque la concentration en chlorophylle augmente de 5 à 90µg/cm², la réflectance passe de 30% à 7% soit plus de 70% de variation relative. Cette variation est encore plus importante pour la transmittance.
- augmentation de la réflectance dans le proche infrarouge [700-900nm] consécutive à une augmentation de l'épaisseur des feuilles traduite par le paramètre N. La variation relative observée pour la réflectance et la transmittance est moins importante que celle observée dans le visible. Elle est de l'ordre de 20%.

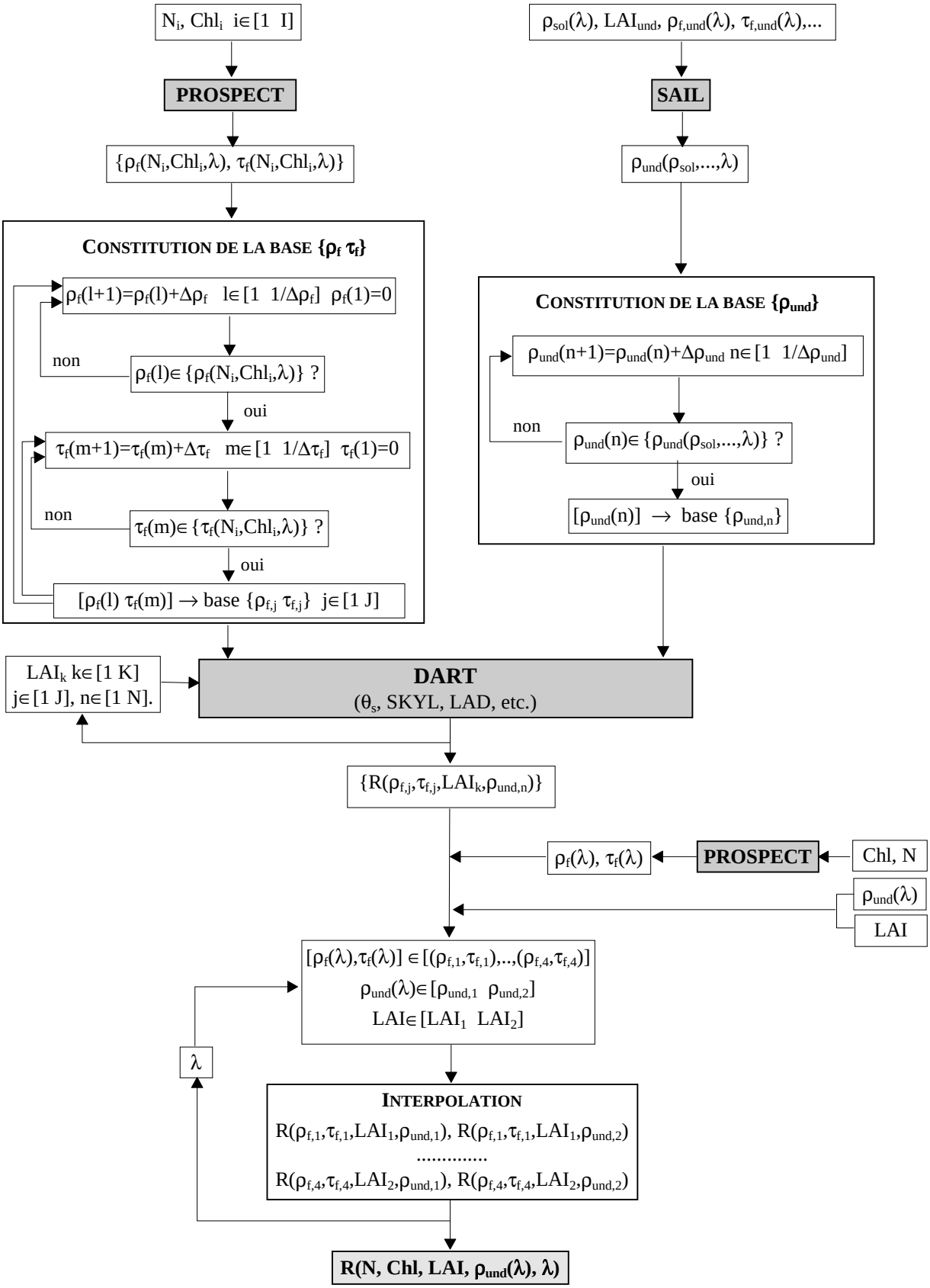


Figure III.7 : Schéma décrivant la méthode développée pour calculer les spectres DART pour tout triplet ((N,Chl),LAI,ρ_{und}).

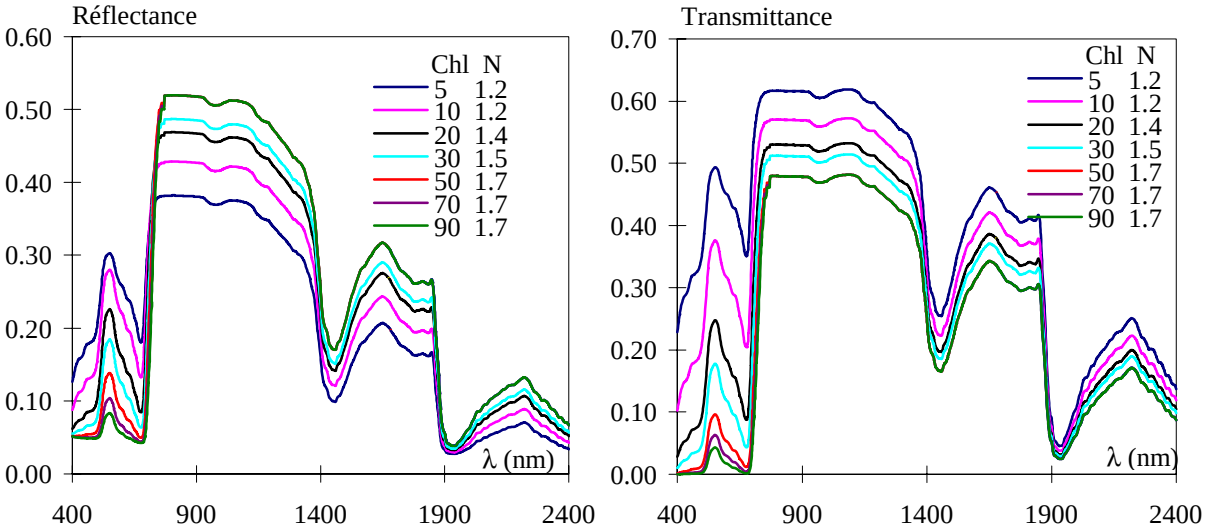


Figure III.9 : Spectres de réflectances (a) et transmittances (b) simulés par PROSPECT pour plusieurs couples (Chl,N). Chl est exprimée en µg/cm².

• Spectres DART

Les spectres de couvert R(λ) ont été simulés pour un perchis de hêtre (H_{13}) dont la concentration en chlorophylle varie de 5 à 90µg/cm², pour une gamme de LAI compris entre 1 et 8 et plusieurs directions de visée (Nadir, 30° et 45° dans le plan principal et perpendiculaire). Le PAI mesuré pour H_{13} est égal à 8. Pour les simulations nous avons assimilé le PAI au LAI. En ce qui concerne le sous-bois, faute de mesures disponibles, nous avons utilisé un spectre de sous-bois simulé avec le modèle SAIL (Fig. III.10). Les caractéristiques architecturales (Tab.III.3) de la maquette de perchis de hêtres (H_{13}) utilisées pour les simulations DART ont été mesurées sur le terrain par le LEV.

Hauteurs des arbres	14.7+/-1m
Diamètre moyen des houppiers	1.6+/-0.2m
Hauteur base houppier	4.2+/-0.5m
Surface moyenne feuille	19.9 cm²
LAD	planophile
Diamètre des troncs	0.07+/-0.02m
Densité	4900 arbres/ha
PAI	8
Taux de couverture	80%

Tableau III.3 : Moyenne et écart-type des paramètres structuraux de H_{13}. Ces valeurs ont permis de générer la maquette informatique, utilisée en entrée du modèle DART.

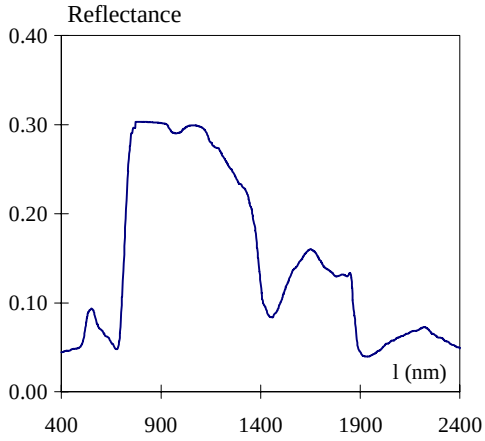


Figure III.10 : Spectre de sous-bois simulé par SAIL. Utilisé dans DART

La figure III.11 représente les spectres obtenus avec DART pour deux configurations de visée (Nadir et 30° dans le plan principal), pour Chl compris entre 5 et 90µg/cm², pour trois LAI différents (1, 4 et 8) et θ_s=30°. Cet angle est celui du zénith solaire pendant l'acquisition des données ROSIS.

Les spectres du couvert évoluent de la même manière, en fonction de la chlorophylle, que les spectres foliaires: R(λ) diminue dans le visible et augmente dans le PIR lorsque Chl et N augmentent, quels que soient le LAI et la direction de visée dans le plan principal et perpendiculaire. De plus, la variation relative de R(λ), correspondant à la dynamique totale de la chlorophylle (80µg/cm²), est similaire à celle observée pour la feuille. Toutefois, la variation absolue de R(λ) pour ΔChl=80µg/cm² dans le visible, est environ deux fois plus faible que celle de la feuille. Ceci est conforme au fait que la réflectance R_{VIS} du couvert est environ deux fois plus faible que celle de la feuille (ρ_{fVIS}).

Une étude quantitative de la sensibilité de R(λ) au LAI et à la chlorophylle est présentée ci-dessous. La sensibilité a été évaluée en calculant les rapports S_{LAI}=ΔR/ΔLAI et S_{Chl}= ΔR/ΔChl.

III.2.2 Sensibilité des réflectances

- Sensibilité des réflectances au LAI

o Visible

La figure III.12 montre l'évolution de S_{LAI} (pour ΔLAI=3) en fonction de la concentration en chlorophylle et de l'angle zénithal d'observation.

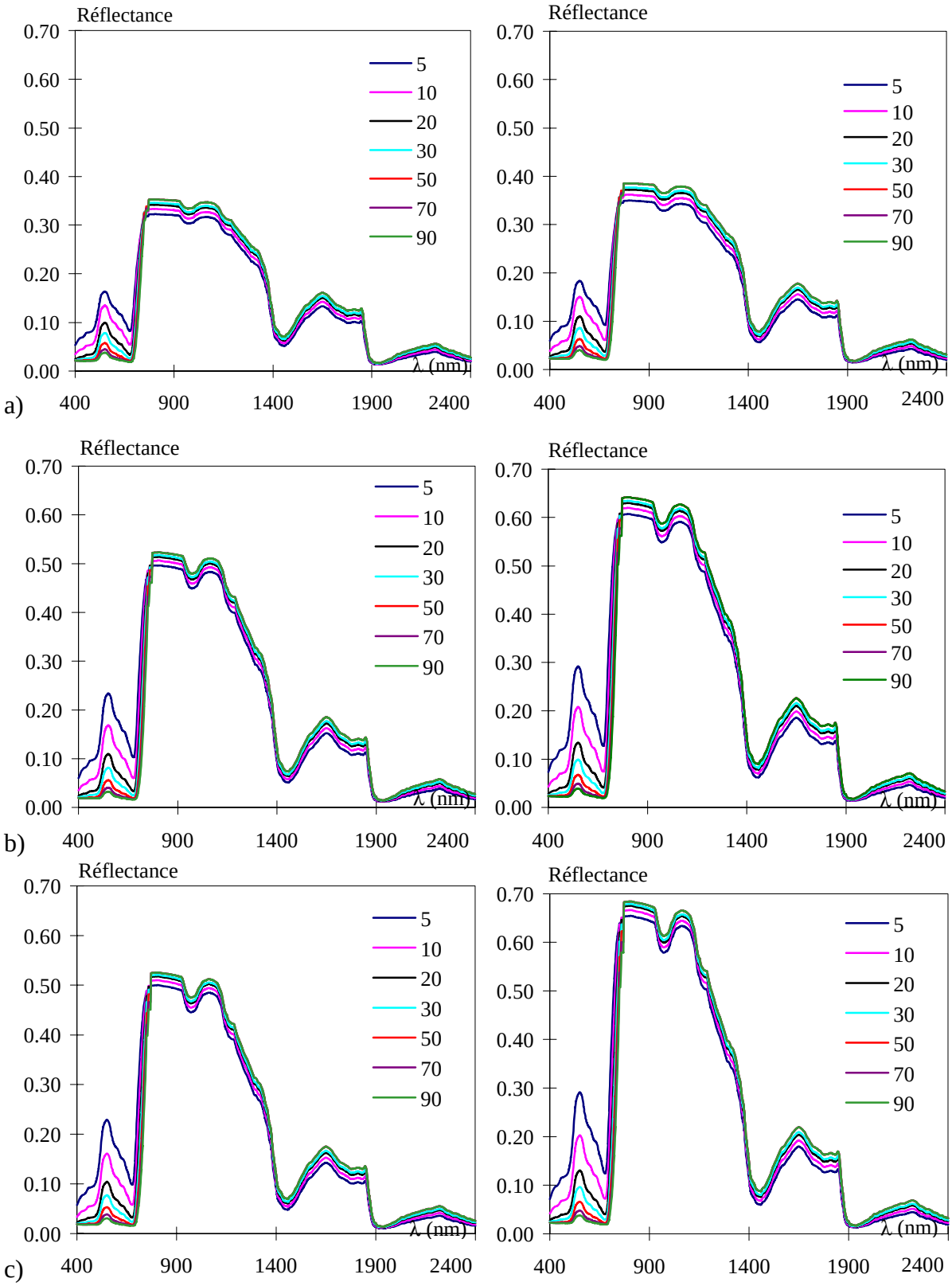


Figure III.11 : Spectres de réflectance DART simulés au nadir (gauche) et à 30° (plan principal) (droite) pour les différents couples (Chl,N) de la figure III.9. a) LAI=1, b) LAI=4, c) LAI=8.

Tout d'abord nous notons que pour une acquisition au nadir, S_{LAI} est positive pour Chl≤30µg/cm² et négative pour Chl ≥ 30µg/cm². Ceci signifie que pour des Chl<30µg/cm² une augmentation du LAI induit une augmentation de R_{VIS}, alors que pour Chl≥30µg/cm², toute augmentation de LAI entraîne une diminution de R_{VIS}. Pour les directions obliques, R(λ) diminue avec le LAI uniquement pour des Chl plus forts (>60µg/cm²). Cette diminution est alors plus faible ($\Delta\rho_{max}$=0.0014).

S_{LAI} décroît avec la concentration en chlorophylle. Ainsi pour des concentrations en chlorophylle de 5µg/cm², ΔR associé à ΔLAI=3 est égale à 4.2% alors que pour Chl=80µg/cm² ΔR est quasiment nulle.

o Proche infrarouge

Dans le PIR, la réflectance R(λ) est sensible uniquement à N et au LAI. Il apparaît que pour un LAI donné, la sensibilité de la réflectance R_{PIR} du couvert à N est environ deux fois plus faible que la sensibilité de $\rho_{f,PIR}$. Cette sensibilité diminue avec le LAI. Une variation de la valeur du LAI de 1 à 4 induit une augmentation moyenne de R(λ) de 15% en absolu de R_{PIR}. Au-delà d'un LAI de 4, la sensibilité au LAI dans le PIR devient très faible: le signal sature.

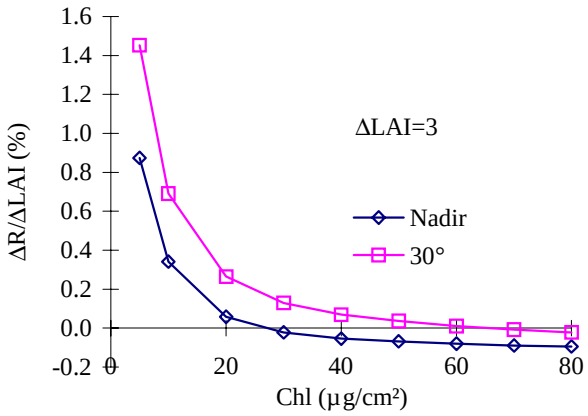


Figure III.12: Sensibilité de R(λ) à (560nm) au LAI et pour différentes concentrations en Chl et directions de visée (Nadir, 30°).

• Sensibilité de la réflectance à la chlorophylle

Les figures III.13 a et b représentent l'évolution de la sensibilité (S_{Chl}) pour ΔChl=10µg/cm², trois LAI et deux directions de visée. L'analyse de ces résultats révèle que d'une manière générale:

(1) $|S_{Chl}|$ diminue avec une augmentation de la concentration en chlorophylle.

(2) $|S_{Chl}|$ augmente avec le LAI.

Quelques valeurs permettent d'illustrer ces remarques. En ce qui concerne la diminution de S_{Chl} avec la concentration en chlorophylle, par exemple, pour un LAI=1, quand Chl augmente de 5 à 80µg/cm², $|S_{Chl}|$ diminue progressivement de 0.47% à 0.03%. L'augmentation de Chl de 80 à 90µg/cm² implique ΔR=0.28% alors que ΔR=0.8% si Chl varie de 40 à 50µg/cm² et ΔR=3% si Chl varie de 5 à 10 µg/cm². Ceci signifie que pour de faibles LAI (≤3) et Chl≈80µg/cm², la précision minimale nécessaire sur la réflectance, pour détecter une variation en chlorophylle de 10µg/cm², est de l'ordre de 0.28%. Pour de plus forts LAI (>4) cette précision minimale est de l'ordre de 0.32%. Elle est augmentée si l'on considère des directions de visée plus élevée. Ainsi, pour θ_v = 30°, la précision minimale nécessaire est ≈0.4%. Il est intéressant de comparer ces chiffres avec les valeurs du rapport signal sur bruit de spectromètres. Ce rapport n'a pu être obtenu pour le capteur ROSIS. Par contre, pour le spectromètre DAIS (Kramer, 1994) ce rapport est de l'ordre de 150 pour une réflectance de 30%, ce qui correspond à un bruit équivalent en réflectance égal à 0.2%. Ceci indique que la précision instrumentale peut être suffisante pour retrouver la chlorophylle avec une précision de l'ordre de 10µg/cm². Mais dans ce cas la connaissance du LAI est l'inconnue majeure concernant l'extraction de la chlorophylle, notamment pour de faibles Chl. En effet, S_{LAI} et S_{Chl} ont des ordres de grandeurs similaires, ce qui montre la difficulté de décorréler l'influence du LAI de celle de la chlorophylle sur la réflectance, compte tenu bien évidemment des ΔChl et ΔLAI choisis. Il doit être noté que S_{LAI} décroît beaucoup plus vite que S_{Chl} quand Chl augmente. Cette tendance est vérifiée pour tout LAI. Elle est d'autant plus marquée que la direction est oblique, ce qui est logique car $\Delta R/\Delta$LAI est d'autant plus faible que θ_v est élevé. Ce résultat souligne l'intérêt d'acquérir des données dans des directions obliques, du moins pour notre cas d'étude.

En résumé, cette étude indique que l'extraction de la chlorophylle est d'autant meilleure que
1- le milieu a un fort LAI (>4)
2- les mesures sont acquises avec des directions de visées obliques.
Il est intéressant de constater que dans un milieu tel que la forêt de Fontainebleau, à partir du mois de mai, la plupart des parcelles (hormis les semenciers) ont des LAI supérieurs à 4. De plus entre mai et juillet, les mesures terrain révèlent que le LAI reste presque constant alors que les concentrations foliaires en chlorophylle varient beaucoup. La gamme des valeurs de concentration en chlorophylle vaut 10-30 µg/cm² au mois de mai alors qu'elle vaut 45-90µg/cm² en juillet. Une forte variation de la concentration foliaire en chlorophylle est donc survenue entre les mois de mai et de juillet.

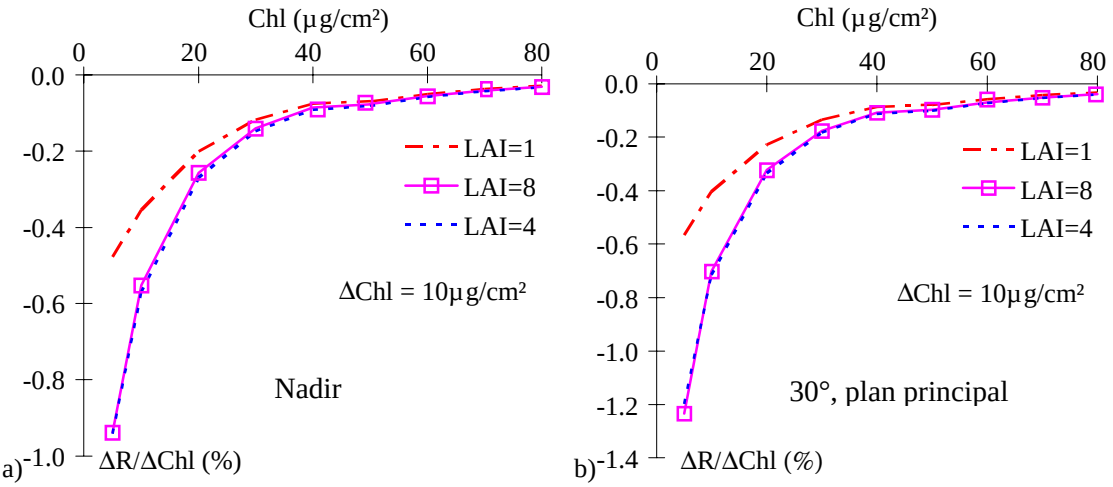


Figure III.13: Variations de S_{Chl} en fonction de Chl et du LAI. a) Nadir et b) θ_v=30°.

• Comparaison des spectres DART, ROSIS, SPOT

Dans un premier temps nous avons comparé les simulations DART, réalisées pour la parcelle H_{13}, aux données ROSIS et SPOT acquises en juillet. La comparaison entre les données DART et ROSIS a été réalisée en moyennant les réflectances DART sur les intervalles spectraux ROSIS. En effet, nous ne disposions pas des courbes de sensibilité des canaux ROSIS, nécessaires pour rendre les mesures DART réellement comparables aux données ROSIS. Par contre, les comparaisons entre SPOT et DART ont été effectuées en pondérant les réflectances DART par les courbes de sensibilités des détecteurs SPOT associées à chaque canal spectral (XS1, XS2, XS3) du capteur SPOT HRV2. A titre indicatif nous avons également comparé les mesures ROSIS et SPOT avec les réflectances SAIL simulées à partir des mêmes paramètres d'entrée que DART.

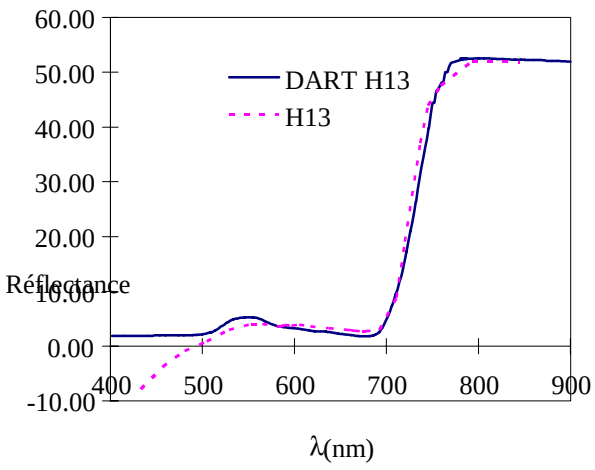
Nous avons ensuite étendu la comparaison DART, ROSIS et SPOT à d'autres parcelles de perchis et gaulis de hêtres que H_{13}. Cette extension n'a de sens que dans la mesure où la structure des parcelles est similaire à celle de H_{13}. Ainsi, nous avons comparé les simulations DART aux mesures ROSIS acquises sur H_{07} (perchis) et H_{08} (gaulis) (Tab. III.4). Le nombre de parcelles survolées par SPOT étant plus important, nous avons pu comparer les simulations DART et les mesures SPOT pour 5 autres parcelles: H_{05} (gaulis), H_{10} (gaulis), H_{06} (perchis), H_{01} (perchis) et H_{02} (perchis).

III.2.3 Comparaisons DART, ROSIS et SPOT

Nous avons tout d'abord comparé les réflectances ROSIS et SPOT. La comparaison dans le vert s'est avérée impossible en raison des problèmes évidents d'étalonnage de ROSIS dans ce domaine

spectral. Ces problèmes sont moins importants que dans le bleu (cf. Fig.II.2, Chap II) mais ils sont suffisamment forts pour modifier notablement le spectre des parcelles (Fig. III.14). Les réflectances R_{rouge} et R_{PIR} ROSIS sont presque toujours supérieures aux réflectances SPOT. Cette supériorité est particulièrement marquée dans le rouge où la différence relative varie entre 30% (H_{13}) et 90% (H_{07}). Un premier travail a consisté à simuler les réflectances SPOT à partir des mesures ROSIS et des courbes de sensibilité des canaux SPOT. Les résultats obtenus confirment les problèmes d'étalonnage rencontrés par les autres utilisateurs des données ROSIS. Ceci souligne une fois encore la prudence extrême avec laquelle il convient d'analyser et de comparer les mesures spatiales et les simulations. Les travaux réalisés avec les données ROSIS ont été effectués en supposant que la précision radiométrique relative à l'intérieur de chaque image spectrale est bonne.

Seule la comparaison avec les réflectances SPOT est donc susceptible de nous permettre de tester la capacité prédictive du modèle DART, dans la mesure où nous supposons que le capteur HRV est bien étalonné. Sur l'ensemble des parcelles considérées (Tab. III.5), les erreurs relatives maximales "DART-SPOT" dans le vert, le rouge et le PIR sont de l'ordre de 6% en moyenne. Les erreurs commises avec SAIL sont sensiblement supérieures dans le visible et très nettement supérieures dans le PIR. Ce résultat souligne l'intérêt de prendre en compte la structure du couvert en vue de l'obtention de réflectances simulées les plus exactes possibles. Cet aspect est en particulier important pour les méthodes d'inversion et d'assimilation des mesures de télédétection dans les modèles de fonctionnement.



III.14 : Spectres DART et ROSIS de H_{13}.

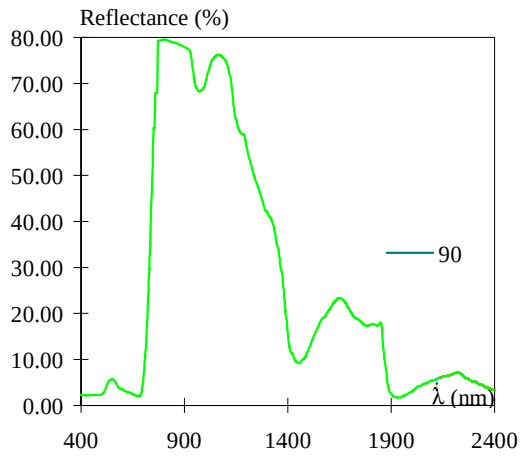


Figure III. 15 : Spectres SAIL de H_{13}

		DART	SAIL	ROSIS	SPOT
H13 (LAI≈8)	Rouge	1.9%	2.2%	2.8%	2.1%
N=1.7 Chl=60µg/cm²	PIR	52.3%	80%	51.8%	52.2%
H07 (LAI≈5.5)	Rouge	2.2%	2.2%	3.6%	1.9%
N=1.7 Chl=60µg/cm²	PIR	51%	67%	47%	45%
H08 (LAI≈6)	Rouge	1.7%	1.9%	3%	1.7%
N=1.7 Chl=80µg/cm²	PIR	52%	74%	54.4%	48.6%

Tableau III.4 : Réflectances DART, SAIL, ROSIS et SPOT Rouge et PIR pour H07 et H13.

		DART	SAIL	SPOT
H05 (LAI≈8) N=1.7 Chl=60µg/cm²	Vert	2.7%	3.24%	3.1%
	Rouge	1.7%	2%	2%
	PIR	52.3%	79%	50.8%
H10 (LAI≈8) N=1.7 Chl=55µg/cm²	Vert	2.8%	4.28%	2.9%
	Rouge	1.8%	2.22%	1.8%
	PIR	52.3%	79%	51.5%
H06 (LAI≈6.6) N=1.7 Chl=60µg/cm²	Vert	3%	3%	2.8%
	Rouge	2%	2%	1.9%
	PIR	51.1%	74%	48.4%
H01 (LAI≈4) N=1.7 Chl=60µg/cm²	Vert	3.2%	3.35%	3%
	Rouge	2.2%	2%	2.2%
	PIR	50%	67%	42.2%
H02(LAI≈3.2) N=1.7 Chl=56µg/cm²	Vert	3.1%	3.3%	2.9%
	Rouge	2%	2%	2.3%
	PIR	49%	63%	42.1%

Tableau III.5 : Réflectances DART, SAIL et SPOT dans le vert (500-590nm), le rouge (610-680nm) et le PIR (790-890nm).

• Relation λ_i-Chlorophylle

La relation entre le point d'inflexion (λ_i) et la concentration en chlorophylle, exprimée en µg/cm², a été étudiée au niveau de la feuille et du couvert. Au niveau du couvert, nous avons également utilisé la chlorophylle pondérée par le LAI, exprimée en g/m² de sol. Le point (λ_i) a été calculé à partir des spectres DART (méthode Chap. II). Nous avons également déterminé les (λ_i) à partir

des spectres SAIL ce qui nous a permis de comparer la relation "λ_i-Chl" associées aux simulations SAIL et DART.

o Relations λ_i-chlorophylle au niveau de la feuille

La relation "λ_i-chlorophylle" a tout d'abord été étudiée au niveau de la feuille (Fig III.16) par inversion des spectres de réflectance PROSPECT (Fig III.9). Nous constatons que lorsque la concentration en chlorophylle et N augmentent simultanément, (λ_i) est décalé vers les grandes longueurs d'onde selon une loi asymptotique (Jacquemoud, 1992). La dynamique de la variation de (λ_i) est égale 21nm. Que devient cette relation au niveau du couvert? Est-elle, comme nous l'avons constaté dans l'approche empirique, peu sensible aux directions de visée et sensible à la chlorophylle ainsi qu'au LAI?

o Relations "λ_i-chlorophylle" au niveau du couvert

La figure III.16 représente aussi la variation "λ_i-Chl" à l'échelle du couvert pour trois LAI et deux directions d'observations (Nadir et 30°). La relation obtenue pour le couvert est similaire à celle observée au niveau de la feuille avec toutefois un différence : la relation "λ_i-Chl" du couvert est décalée vers les grandes longueurs d'ondes. Ce décalage est d'autant plus important que le LAI du couvert est fort. Ainsi pour une même concentration en chlorophylle (50µg.cm²) et une acquisition au nadir, une augmentation du LAI de 1 à 4 induit $\Delta\lambda_i$=6nm, si bien que l'erreur sur l'estimation de la chlorophylle peut atteindre 25µg/cm². La forte sensibilité de la relation "λ_i-Chl" au LAI souligne la difficulté d'évaluer la concentration en chlorophylle exprimée en µg/cm² à partir du seul calcul du (λ_i), si le LAI est faible (<4) et n'est pas connu avec une précision suffisante. Par contre, cette difficulté disparaît si le LAI est supérieur à 4. Ainsi, l'erreur commise en supposant le LAI égal à 4 au lieu de 8 est systématiquement inférieure à 10µg/cm² (Fig. III.16). Pour les faibles concentrations en chlorophylle, cette erreur est nettement inférieure. Elle est de l'ordre de 5µg/cm² si Chl<40µg/cm².

La figure III.16 illustre la robustesse de la position de λ_i par rapport à la direction de visée. Nous n'observons aucune sensibilité pour LAI=1 et 4, et une très faible sensibilité pour LAI=8.

On s'aperçoit (Fig. III.16) que pour ce type de couvert (perchis), le modèle SAIL donne d'aussi bons résultats que le modèle DART. Ainsi, un outil tel que SAIL qui simule de manière

imprécise le FRD de couverts est susceptible de conduire à des relations "λi-Chl" équivalentes à celles fournies par un modèle beaucoup plus complet tel que DART.

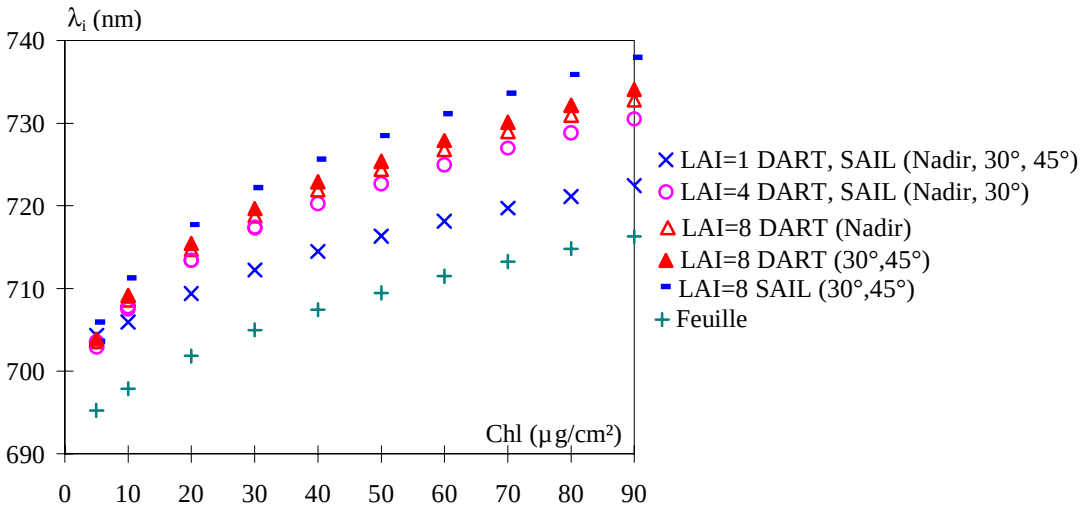


Figure III.16 : Relations λ_i-Chl au niveau de la feuille et du couvert pour différents LAI et direction de visée (Nadir ,30° et 45° plans principal et perpendiculaire). Simulations SAIL et DART. Chl est exprimée en µg/cm² de feuille.

La relation "λ_i-Chl" a également été simulée pour une futaie de hêtres. Les paramètres utilisés pour simuler la futaie sont identiques à ceux utilisés pour le perchis hormis la densité d'arbres qui a été fixée à 500 arbres/ha. La relation obtenue est présentée dans la figure III.17. Ces résultats montrent la forte sensibilité de λ_i à l'architecture du couvert. Ainsi, pour un même LAI, le point (λ_i) est décalé vers les grandes longueurs d'ondes lorsqu'on passe d'un couvert homogène (perchis) à un couvert plus hétérogène (futaie). Par exemple, pour Chl=50µg/cm² et LAI=4, (λ_i) augmente d'environ 10nm quand on passe du perchis à la futaie. L'importance des variations de λ_i peut expliquer pourquoi nous n'avons pas trouvé, au cours de l'approche empirique, de relation entre (λi) et la chlorophylle exprimée en µg/cm².

Nous avons aussi étudié la relation entre (λ_i) et la chlorophylle pondérée par le LAI. Cette étude a été réalisée en multipliant chaque valeur de LAI par les valeurs de Chl en ne retenant que les combinaisons (LAI, Chl) rencontrées sur le terrain. Les simulations permettent de reproduire la tendance observée avec les données ROSIS (Fig III.18) mais avec une dynamique des (λ_i) beaucoup plus forte.

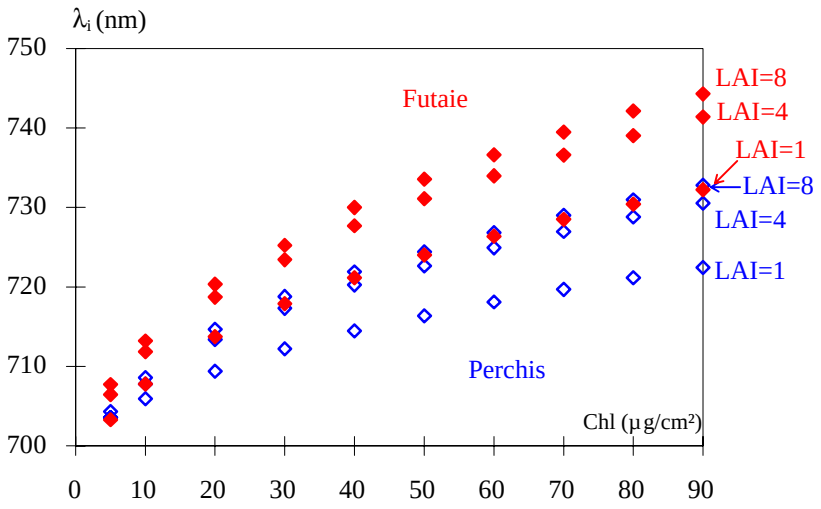


Figure III.17 : Relations "λi-Chl" simulées pour un perchis et une futaie de hêtres pour différents LAI au nadir. Chl est exprimée en µg/cm² de feuille.

Il s'avère qu'en prenant en compte des valeurs réalistes pour la relation "λ_i-Chl" exprimée en µg/cm² foliaire, *i.e.* pour des LAI <4 on prend Chl ∈ [5-30µg/cm²] et pour des LAI ≥4 Chl ∈ [40 80µg/cm²], on trouve une relation aussi satisfaisante que celle établie à partir de Chl exprimée en g/m² de sol (r^2=0.93 pour DART et 0.9 pour SAIL).

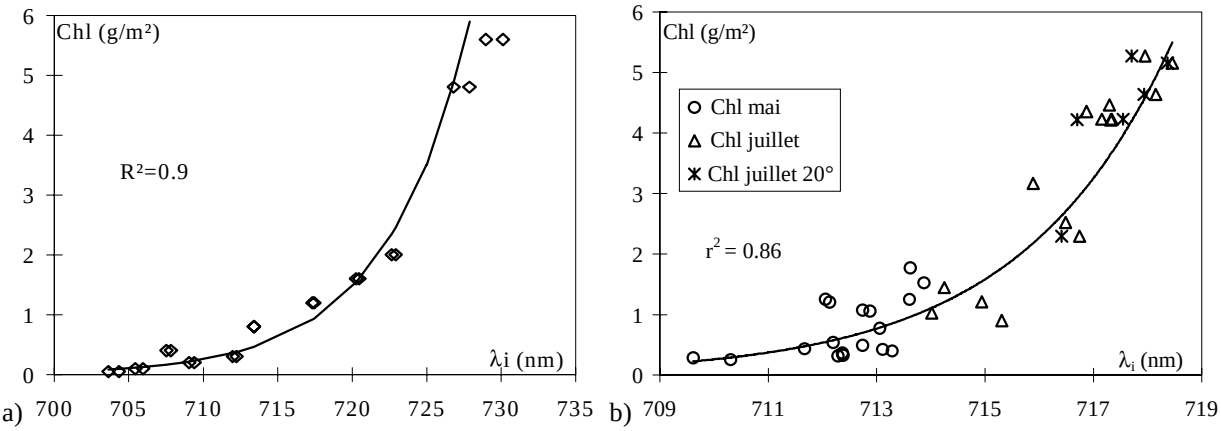


Figure III.18 : Relations "λ_i-Chl" au niveau du couvert. Chl est exprimée en g/m² de sol. a) Simulations DART. b) Mesures ROSIS.

IV CONCLUSION PARTIELLE

La première partie de ce chapitre a consisté a étudier de manière théorique le comportement anisotrope de la FRD de couverts forestiers en fonction de différents paramètres: LAI, ω_f, θ_v et θ_s. Les fortes différences entre les FRD DART et SAIL ont mis

en évidence l'influence de la structure des couverts sur le comportement et la valeur des FRD.

Une attention particulière a été consacrée à l'évaluation de la capacité prédictive du modèle DART. Ce travail a été réalisé avec la comparaison de simulations DART et de mesures expérimentales. Malheureusement, des problèmes d'étalonnage du capteur ROSIS ont rendu les comparaisons avec DART impossibles. Seules les comparaisons avec les données SPOT sont apparues fiables. Les résultats obtenus soulignent l'intérêt de recourir à un modèle prenant en compte l'hétérogénéité des couverts pour pouvoir simuler de manière précise les réflectances de couverts forestiers.

Des simulations DART, couplées avec des simulations PROSPECT, ont permis de vérifier l'existence de relations entre (λ_i) et la chlorophylle du couvert. Nous avons pu également vérifier la robustesse de ces relations aux directions d'observation mais leur forte sensibilité au LAI ainsi qu’à l’effet " structure du couvert".

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION

La première partie de mon travail de thèse a été entièrement consacrée au développement d'un modèle de transfert radiatif (Gastellu-Etchegorry *et al.*, 1996 ; Annexe 1) à la fois original, performant et relativement souple d'utilisation. Dans une deuxième partie, j'ai contribué à deux projets dont l'objectif commun était d'évaluer l'apport de la télédétection, et en ce qui me concerne de la modélisation du transfert radiatif, pour le suivi temporel de deux milieux forestiers : la forêt tropicale de Sumatra (Gastellu-Etchegorry *et al.*, 1997 ; Annexe 2) et la forêt tempérée de Fontainebleau (Demarez *et al.*, 1997). Cette monographie est centrée sur la présentation du modèle DART et de quelques cas d'applications réalisés pour tester la validité de ce modèle, ainsi que sur un travail dont l'objet était d'étudier le potentiel de la télédétection hyperspectrale pour le suivi temporel de la concentration en chlorophylle de la forêt de Fontainebleau. Ce dernier travail m'a permis de développer une approche à la fois empirique et théorique. Un de mes objectifs a été d'adapter et utiliser l'outil "modélisation" pour mieux comprendre et interpréter la mesure de télédétection, avec la volonté de déboucher sur des avancées concrètes.

Une hypothèse sous-jacente au développement du modèle DART est que le mode de représentation du milieu, le mode de propagation du rayonnement et le mode de représentation des mécanismes d'interaction électromagnétique employés sont suffisants pour (1) la majorité des applications thématiques à partir de données de télédétection spatiale, et pour (2) de nombreuses applications qui utilisent la distribution 3-D du rayonnement dans le couvert.

L'apport majeur du modèle DART par rapport à la plupart des modèles de transfert radiatif existants est de simuler avec une plus grande précision des FRD, des images 2-D et la distribution 3-D du régime radiatif de couverts hétérogènes tels que les couverts forestiers. Un aspect particulièrement intéressant de ce modèle est de pouvoir opérer avec des niveaux de représentation du paysage qui peuvent être très simples, comme avec le modèle SAIL, ou plus ou moins complexes, selon notre connaissance a priori du milieu.

De nombreux travaux empiriques (Kimes, 1986) et théoriques (Gastellu-Etchegorry *et al.*, 1997) ont déjà montré la nécessité de prendre en compte la structure 3-D des couverts hétérogènes pour simuler avec une bonne précision la forte anisotropie de leurs FRD. Ainsi, le fait de négliger cette structure peut induire des erreurs supérieures à 50% en valeur relative. Un problème

important est d'évaluer l'erreur tolérable. Bien évidemment cette dernière est très dépendante de l'application envisagée. Dans certains cas, le niveau de précision doit être très élevé. Ceci est en particulier le cas pour :

- le calcul de l'albédo de milieux terrestres, en particulier si le nombre de mesures directionnelles est limité,
- l'assimilation de mesures de télédétection dans des modèles de fonctionnement. Des simulations imprécises de réflectance sont susceptibles d'entraîner des résultats erronés.
- l'inversion de mesures de télédétection. Cette opération est particulièrement sensible à la précision du modèle utilisé.

Différents travaux conduits avec le modèle DART ont déjà illustré sa souplesse d'utilisation dans différents domaines d'application : inversion de données satellitales (Estève *et al.*, 1997), étude de la texture de couverts (Pinel et Gastellu-Etchegorry, 1997), études de sensibilité de la réflectance à la structure du couvert (Gastellu-Etchegorry *et al.*, 1997), étude de la distribution 3-D du rayonnement absorbé dans un milieu forestier (Gastellu-Etchegorry et Trichon, 1997 ; Guillevic et Gastellu-Etchegorry, 1997), étude de la biochimie foliaire (Demarez *et al.*, 1997). Ces travaux ont généralement mis en évidence l'intérêt du modèle DART pour mieux comprendre et interpréter les mesures de réflectance.

La simulation très précise de réflectances n'est cependant pas toujours une nécessité. Dans certains cas, des modèles aussi simples que le modèle SAIL ou le modèle géométrique de Stralher (1985) sont susceptibles de fournir des informations extrêmement intéressantes sur la sensibilité de la réflectance du milieu à différents paramètres biophysiques et expérimentaux. L'utilisation de modèles simples peut donc s'avérer suffisante s'il n'est pas recherché l'obtention de réflectances simulées exactes. Ainsi, des modèles très simples peuvent permettre de déterminer avec une bonne précision des indicateurs biophysiques ou biochimiques des couverts comme des rapports de réflectances directionnelles ou spectrales ou des dérivées spectrales. Notre connaissance du comportement radiatif des milieux terrestres n'est cependant pas encore assez avancée pour connaître a priori la précision et la robustesse de tels indicateurs. Un modèle tel que DART peut alors servir à tester et développer ce type d'indicateur.

Le travail empirique réalisé sur la forêt de Fontainebleau concerne l'apport de données hyperspectrales du capteur ROSIS pour l'extraction du LAI et de la chlorophylle. Une analyse comparative a été réalisée avec les données du capteur multispectral SPOT HRV. L'analyse des réflectances ROSIS et SPOT HRV a fait apparaître un problème d'étalonnage des mesures ROSIS, en particulier dans le visible. La mesure des caractéristiques structurales et optiques des parcelles forestières survolées nous a permis de simuler leurs réflectances. Ces dernières se sont avérées très proches des réflectances mesurées avec le capteur SPOT HRV. Le faible nombre de mesures disponibles n'a cependant pas permis d'effectuer une validation du modèle DART. La simulation des réflectances du couvert avec le modèle SAIL a permis de montrer que la non prise en compte de la structure du couvert par ce modèle conduit à des réflectances erronées, comme dans le cas de l'étude menée sur la forêt de Sumatra.

Les résultats empiriques font apparaître que les mesures multispectrales (3 canaux) telles que SPOT HRV sont équivalentes aux mesures spectrométriques pour estimer le LAI. Dans tous les cas, quelles que soient les données utilisées, les relations empiriques établies à partir des indices spectraux classiques (NDVI, SR) et des réflectances, sont extrêmement sensibles aux directions de visée et d'éclairement et à l'atmosphère. De plus, ces relations sont aussi sensibles à la structure du couvert. L'importance de cette dernière a été mise en évidence avec des simulations DART.

Les données spectrométriques sont les seules données susceptibles de permettre l'estimation de la chlorophylle. Les régressions "chlorophylle - réflectances" n'ayant pas donné de bons résultats, la chlorophylle a été recherchée par l'intermédiaire de la détermination du point d'inflexion (λ_i) du spectre VIS/PIR du couvert. Ce travail a été conduit pour la chlorophylle foliaire ($\mu g/cm^2$) et la chlorophylle du couvert (g/m^2). Il est apparu une forte corrélation entre (λ_i) et la chlorophylle foliaire quand on regroupe les mesures de mai et de juillet, en raison de l'augmentation de la chlorophylle entre ces deux mois. Aucune relation n'a cependant été obtenue à chaque date. Cette absence de relation peut être due à la faible dynamique de la chlorophylle à chaque date. Par contre, la régression "(λ_i) - chlorophylle du couvert" s'est avérée fournir un fort coefficient de détermination (r^2=0.83).

Ce résultat encourageant a été confirmé par l'analyse des points (λ_i) des spectres de couvert simulés avec le modèle DART. Il est apparu que pour les couverts étudiés (perchis de hêtres) la

chlorophylle foliaire est très bien reliée au point (λ_i) qu'elle soit exprimée en g/m² de sol ou en µg/cm² de feuille. Mais quelques différences subsistent entre les relations empiriques et simulées notamment concernant la gamme des valeurs de λ_i qui s'avère être plus restreinte pour les données empiriques que pour les simulations.

L'étude théorique a fait d'autre part apparaître qu'un modèle tel que SAIL permet d'établir des tendances similaires à celles établies avec le modèle DART. Ceci souligne le fait qu'un modèle simple peut fournir des tendances réalistes même s'il ne simule pas correctement les réflectances. Dans notre cas, le modèle DART n'a donc servi qu'à tester la validité des relations dérivées du modèle SAIL, à supposer bien évidemment que les tendances dérivées du modèle DART soient exactes. Ces travaux de modélisation ne sont cependant que préliminaires. Ils doivent être poursuivis sur d'autres milieux tels que les futaies et les semenciers. La relation "(λ_i) - chlorophylle" obtenue pour les perchis est-elle alors conservée ? Il est également nécessaire de poursuivre cette étude avec de nouvelles mesures de terrain et aéroportées. Une nouvelle campagne aéroportée est ainsi prévue sur le site de Fontainebleau avec le capteur DAIS (Kramer, 1994).

Un autre problème concerne la validité des relations obtenues à différentes résolutions spatiales. En effet la relation "(λ_i) - chlorophylle" a été déterminée à partir de données haute résolution spatiale (entre 5 et 15m). Mais que devient cette relation pour d'autres échelles spatiales (kilométrique par exemple)? Existe-t-il toujours à d'autres échelles une relation? C'est face à ce type d'interrogation qu'il est envisagé d'étudier le comportement de la réflectance, et donc de ces relations, lorsqu'on passe d'une échelle à l'autre. L'originalité de l'approche retenue réside dans le fait qu'elle est basée sur la modélisation de la réflectance à partir du couplage de deux modèles de transfert radiatif qui opèrent à deux résolutions (métrique et hectométrique, voire kilométrique). Cet objectif revêt une grande importance dans le contexte des futurs systèmes satellitaires spectrométriques et multi-résolution (*e.g.*, SPOT/Végétation, MERIS et EOS/MODIS).

ANNEXE



Photo A4-1: Gaulis



Photo A4-2: Perchis



Photo A4-3: Semencier



Photo A4-4: Futaie

	Visible			Proche-infrarouge			
PAI	Nom	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Type	Nb pixels
2.25	P04	3.11	0.48	16.94	2.14	Futaie	676
5.44	P08	2.97	0.41	17.65	1.47	Fourré	609
0.88	P12	4.85	0.62	17.8	1.91	Semencier	371
2.03	P03	3.57	0.57	18.57	2.87	Futaie	378
2.77	P11	3.33	0.53	18.57	2.73	Semencier	308
5.11	P01	3.08	0.53	18.93	2.99	Futaie	270
5.02	P02	3.18	0.48	19.21	2.21	Futaie	308
4.54	P13	3.02	0.47	19.21	2.94	Futaie	693
?	C10	4.85	0.7	24.1	2.95	Futaie	598
1.28	C13	4.47	0.72	28.73	4.5	Semencier	1426
1.64	C07	3.47	0.67	30.71	5.76	Semencier	1216
1.68	C11	3.45	0.63	31.34	5.56	Semencier	986
1.31	C12	4.52	1.05	33.03	6.57	Semencier	816
1.39	C20	3.88	0.81	33.22	6.25	Semencier	560
1.32	C09	3.51	0.7	33.32	6.17	Semencier	812
1.42	CH3	4.14	1.03	34.43	5.74	Semencier	686
4.81	C19	3.33	0.56	34.78	4.73	Futaie	667
5.88	C03	4.24	0.53	36.38	3.98	Futaie	1125
6.11	CH1	4.07	0.65	36.6	4.52	Futaie	1386
5.77	CH4	3.3	0.53	36.8	3.7	Semencier	1144
6.08	C05	3.31	0.77	36.93	6	Taillis	1840
5.76	C04	3.85	0.61	37.02	4.72	Futaie	1519
2.97	H02	3.92	0.62	37.67	5.28	Perchis	861
4.11	H03	4.36	0.88	38.18	6.67	Futaie	1980
6.12	H06	3.89	0.77	39.84	6.94	Perchis	100
4.25	H12	4.64	0.76	40.42	6.18	Futaie	1092
5.92	H08	4.16	0.49	42.71	4.56	Gaulis	836
6.3	H04	4.26	0.78	42.9	7.3	Futaie	864
3.39	H01	4.24	0.52	43.57	5.28	Perchis	920
4.86	H07	4.43	0.54	44.22	4.62	Perchis	524
7.32	H10	4.67	0.56	48.91	5.01	Gaulis	499

Tableau A4.1 : Réflectance moyennes et écart-types dans le visible (530-660nm) et le proche infrarouge des parcelles survolées par ROSIS en mai (Nadir). La dernière colonne correspond aux nombres de pixels utilisés pour calculer la réflectance.

	Visible			Proche-infrarouge			
PAI	Nom	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Type	Nb pixels
6.37	P05	3.4	0.14	26.91	0.85	Gaulis	54
6.61	P06	3.71	0.38	28.22	2.74	Gaulis	191
1.19	C21	6.38	0.28	38.38	4.1	Semencier	1500
4.97	C08	3.44	0.43	38.52	3.48	Semencier	1976
4.08	H09	3.69	0.57	40.93	4.96	Futaie	963
1.18	C20	5.67	1.55	40.99	5.85	Semencier	1509
2.22	C07	5.29	1.31	41.15	6.69	Semencier	976
6.71	CH2	3.65	0.6	41.67	5	Futaie	1124
5.88	C06	3.18	0.28	41.82	3.04	Futaie	373
6.21	C04	3.85	0.44	42.48	3.65	Futaie	237
1.88	C11	5.56	1.35	42.57	5.56	Semencier	388
6.55	CH5	3.61	0.35	43.85	3.81	Semencier	1177
1.54	CH3	4.41	0.83	44.28	6.39	Semencier	1592
1.44	C09	4.93	1.06	44.31	6.94	Semencier	382
5.61	C19	4.08	0.33	44.91	2.97	Futaie	402
6.27	CH4	4.03	0.22	46.02	2.08	Semencier	439
5.21	H07	4.95	1.09	46.87	4.82	Perchis	207
2.97	C16	4.36	0.39	47.04	1.91	Gaulis	751
6.26	C18	4.2	0.31	50.56	2.65	Gaulis	585
8.06	H13	4.01	0.26	51.83	2.59	Perchis	1398
6.43	H08	4.44	0.23	54.47	3.29	Gaulis	335

Tableau A4.2 : Réflectance moyennes et écart-types dans le visible (530-660nm) et le proche infrarouge des parcelles survolées par ROSIS en Juillet (Nadir).

	Visible			Proche-infrarouge			
PAI	Nom	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Type	Nb pixels
1.3	P12	4.09	0.73	23.63	2.37	Semencier	539
2.23	P11	3.1	0.5	23.76	3.1	Semencier	308
4.23	P08	3.24	0.24	24.13	1.64	Fourre	714
6.53	P13	2.52	0.33	24.7	2.5	Futaie	618
3.89	P03	4.11	0.34	25.82	1.62	Futaie	428
?	P02	3.7	0.2	26	1.93	Futaie	452
3.87	P04	3.83	0.36	26.7	2.38	Futaie	742
1.39	C13	3.19	0.85	32.1	4.19	Semencier	1551
1.88	C11	2.74	0.74	32.87	4.32	Semencier	1739
2.22	C07	2.72	0.68	33.65	4.83	Semencier	1431
4.97	C08	1.95	0.38	34.43	4	Futaie	652
1.18	C20	3.3	1.12	34.49	5.27	Semencier	1765
1.19	C21	3.84	1.1	34.76	5	Semencier	1503
3.81	C10	3.87	0.29	36.15	2.97	Futaie	751
4.08	H09	2.15	0.52	36.84	5.34	Futaie	1346
5.61	C19	2.44	0.27	37.24	2.88	Futaie	655
5.88	C06	1.82	0.28	38.37	3.03	Futaie	874
5.21	H07	2.88	0.6	41.92	3.6	Perchis	603
6.43	H08	2.69	0.15	43.2	2.36	Gaulis	525
2.97	C16	2.81	0.39	43.68	1.91	Gaulis	908
6.26	C18	2.62	0.26	45.75	2.62	Gaulis	619
8.06	H13	2.4	0.18	47.67	2.04	Perchis	617

Tableau A4.3 : Réflectance moyennes et écart-types dans le visible (530-660nm) et le proche infrarouge des parcelles survolées par ROSIS en Juillet (20°).

		Vert		Rouge		Proche infrarouge			
LAI	Nom	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Type	Nb pixels
4.23	P08	3.30	0.20	2.30	0.30	23.70	0.90	Fourré	766
3.89	P03	3.50	0.50	3.20	0.80	23.80	1.40	Futaie	459
2.23	P11	3.70	0.30	3.20	0.30	23.80	2.20	Semencier	382
1.3	P12	5.60	0.60	6.10	1.00	24.00	1.50	Semencier	552
3.87	P04	3.20	0.30	2.40	0.30	24.20	1.80	Futaie	825
4.45	P09	3.60	0.20	2.60	0.30	24.50	1.40	Futaie	300
?	P02	3.10	0.10	2.20	0.30	24.90	1.70	Futaie	554
8.28	P01	3.20	0.20	2.20	0.20	25.50	1.50	Futaie	271
?	P10	4.10	0.20	3.80	0.30	25.80	0.50	Fourré	150
6.53	P13	3.10	0.20	2.00	0.20	26.10	1.90	Futaie	810
6.37	P05	3.00	0.20	2.00	0.10	26.60	1.50	Gaulis	54
6.61	P06	3.50	0.20	2.80	0.30	27.00	1.10	Gaulis	191
?	P07	4.00	0.10	3.80	0.20	29.60	2.20	Fourré	254
1.39	C13	3.80	0.70	3.30	0.80	33.30	2.20	Semencier	1601
1.88	C11	3.30	0.70	2.70	0.70	35.20	2.60	Semencier	2119
1.19	C21	5.10	1.50	5.40	1.50	35.20	1.90	Semencier	1510
2.22	C07	3.10	0.60	2.20	0.50	35.90	2.50	Semencier	2156
1.18	C20	4.00	0.90	3.30	0.90	36.30	3.00	Semencier	2005
4.97	C08	2.50	0.30	1.50	0.20	37.20	1.90	Futaie	2391
2.59	H11	3.30	0.40	2.80	0.30	37.20	2.50	Semencier	456
0.51	C12	5.10	1.20	4.60	1.00	38.10	3.40	Semencier	823
3.81	C10	3.10	0.20	1.60	0.30	38.50	1.40	Futaie	866
1.44	C09	3.00	0.40	2.10	0.30	39.20	3.80	Semencier	1201
5.61	C19	2.40	0.20	1.30	0.20	39.40	2.90	Futaie	803
6.21	C04	2.70	0.30	2.00	0.20	40.30	2.30	Futaie	1713
6.27	CH4	2.50	0.20	1.30	0.10	40.30	2.00	Semencier	1327
6.07	CH1	2.70	0.20	1.90	0.20	40.50	3.60	Futaie	1396
4.27	H03	2.90	0.30	2.10	0.20	40.60	3.10	Futaie	1993
4.08	H09	2.60	0.30	1.70	0.30	40.60	3.20	Futaie	1563
1.54	CH3	3.10	0.40	2.10	0.30	40.80	2.40	Semencier	2250
6.39	C03	2.50	0.20	1.50	0.20	41.60	1.70	Futaie	1129
5.88	C06	2.60	0.20	1.50	0.20	41.70	1.40	Futaie	937
6.71	CH2	2.80	0.30	1.60	0.30	42.00	1.50	Futaie	1124
3.21	H02	2.90	0.30	2.30	0.40	42.10	1.10	Perchis	868
3.58	H01	3.00	0.20	2.20	0.20	42.20	0.90	Perchis	930
5.33	H12	3.10	0.20	2.10	0.20	42.20	1.40	Futaie	1097
4.18	H04	2.80	0.20	2.00	0.30	43.70	0.50	Futaie	866
6.55	CH5	2.80	0.20	1.80	0.20	44.10	2.20	Semencier	2036
5.21	H07	2.90	0.40	1.90	0.30	44.80	3.70	Perchis	729
2.97	C16	3.50	0.30	2.10	0.20	47.30	1.70	Gaulis	1111
6.65	H06	2.80	0.20	1.90	0.10	48.40	1.30	Perchis	100
6.43	H08	2.80	0.20	1.70	0.20	48.60	1.90	Gaulis	960
6.26	C18	3.00	0.30	1.90	0.20	49.20	3.00	Gaulis	822
7.69	H05	3.10	0.20	2.00	0.10	50.80	1.80	Gaulis	678
7.96	H10	2.90	0.10	1.80	0.20	51.50	5.30	Gaulis	502
8.06	H13	3.20	0.20	2.10	0.20	52.20	3.60	Perchis	1709

Tableau A4.4 : Réflectance moyennes et écart-types dans le vert (530-590nm), rouge (610-680nm) et le proche infrarouge (790-890nm) des parcelles survolées par SPOT en Juillet .