N° d'ordre : XXXX

THÈSE

présentée en vue de l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ PAUL SABATIER DE TOULOUSE

Spécialité : Télédétection de la Biosphère Continentale - Modélisation

Par

Emmanuel MARTIN

DART : MODÈLE 3D MULTISPECTRAL ET INVERSION D'IMAGES OPTIQUE DE SATELLITE - APPLICATION AUX COUVERTS FORESTIERS -

Soutenue le 25 Juillet 2006 devant la commission d'examen composée de :

M. Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry	Professeur UPS, CESBIO, Toulouse	Directeur de Thèse
M. François-Marie Bréon	Ingénieur CEA, LSCE, Saclay	Rapporteur
M. Li Zhaoliang	Chargé de Recherches, GRTR, Strasbourg	Rapporteur
M. Patrice Henry	Ingénieur CNES, Toulouse	Examinateur
M. Jean-Pierre Madier	Directeur de société, Magellium, Toulouse	Examinateur
M. Jean-Claude Menaut	Directeur de Recherches CNRS, CESBIO	Examinateur

---

Centre d'Études Spatiales de la BIOsphère
18, avenue Édouard Belin
31401 Toulouse Cedex 9, France

"If the doors of perception were cleansed every thing would appear to man as it is, infinite"

William Blake

Au moment où j'écris ces lignes la pression de fin de thèse est tombée, l'été a laissé place à l'automne et j'ai tout le plaisir d'écrire ces lignes dans le calme et la sérénité.

Mes premiers remerciements s'adressent bien sûr tout d'abord à mon directeur de thèse Jean-Philippe. Même si nous n'avons pas toujours été sur la même longueur d'onde, ces années passées à travailler avec toi ont été riches d'enseignements. Merci à Toi Jean-Philippe, pour ton énergie, ta générosité, ta rigueur et l'influx que tu as su donner à ce travail.

Merci à l'ensemble des membres du jury pour avoir accepté de lire et critiquer ce travail et plus particulièrement à François-Marie Bréon pour avoir écourté ses vacances, à Jean-Claude Menaut, directeur du CESBIO et président du jury, qui m'a accordé toute sa confiance, et à Jean-Pierre Madier qui me permet d'explorer de nouveaux horizons.

Je tiens également à remercier tous les "permanents" du CESBIO et en particulier Nadia-Louise pour sa gentillesse, Monique pour sa disponibilité lors des missions inopinées et Antoine pour sa sympathie et son aide lors des crashs. Merci à Eric et Christophe qui ont guidé mes premiers pas dans le milieu de la recherche. Merci à Vous.

Merci aussi à tous les anciens et anciennes de la "DART team", ceux et celles avec qui j'ai eu le plaisir de travailler mais aussi ceux et celles que j'ai rencontrés lors de congrès ou au travers de leurs œuvres "dartiennes". Un merci tout particulier à Alice, compagne du bureau 07 et à mes amis : el Ferranillo, mon prédécesseur, qui a su me transmettre la fibre DART, Vincent "l'ours mystique", Polo "le jeun's" et le "mentor" Guillaume, soumis à rude épreuve pour le baptême du feu industriel avec Magellium. Merci à Toi Zbynek pour ta générosité et ta passion de la Nature. Merci à Toi Stéphane pour toutes ces discussions et voyages initiatiques. Muchas Gracias Amigos, Magos de la Vida.

Un grand merci aussi à mes compagnons de route (honneur aux filles) : Anne, Sylvie compagne de galère, Maria-José, Maria-Carmen, Nico, Joost, Erick, Christophe, Daniel, Fred, Yahn, Lionel.

Merci les amis à tous ceux qui ont participé à les festes de la Mercè 2005 (honneur aux jeunes) : Ben (le bof), Rubé, Iskander "le lézard" ou "bender" pour les intimes, les collocs Jérôme et Fred les descendants celtes, les 2 Olivier à l'accent enchanteur, Laurent "el montagnol" et la bandas couserannaise : Cedrico "le serpent à plumes", Mathias "le dragon", Jef, Christophe, Cyrille, Ludo, Yohan, Spartacus, sans oublier bien sûr les Magics. Je n'oublie pas non plus ceux du Larzac 2003 : Exceptionnel !

Merci bien sûr à ma famille d'ici et d'ailleurs, à mes parents qui m'ont montré la Voie.

Je ne t'oublie pas toi aussi lecteur, passionné ou simplement curieux de la Vie.

Enfin mille mercis à la Vie qui a mis sur mon chemin ma petite femme, ma chamane qui porte en elle le plus beau cadeau du monde. Merci à Toi, la Nine pour tout ce que tu m'apportes tous les jours.

A Toi, petite hirondelle, qui n'es pas encore née.

Résumé

En télédétection optique, les modèles de transfert radiatif (T-R) simulent la mesure radiométrique du capteur au sein du système "Paysage terrestre - Atmosphère". Ces modèles sont des outils particulièrement intéressants pour analyser ces mesures et les relier aux paramètres d'intérêt des surfaces terrestres comme l'indice foliaire (LAI), du fait de son rôle clef dans les échanges gazeux à l'interface "Biosphère - Atmosphère".

Les principales limitations des modèles existants résident dans les hypothèses simplificatrices utilisées pour la représentation géométrique du paysage et la modélisation du T-R associé, notamment pour la végétation. Ainsi, la quasi totalité des modèles simulent les mesures de télédétection en tant que mesures ponctuelles, omettant le contexte spatial des images de télédétection. Aussi, de nombreux modèles négligent l'hétérogénéité des surfaces terrestres ou ne la prennent en compte que de manière très imprécise. Ces limitations sont d'autant plus contraignantes que la résolution spatiale des images de télédétection est fine (très haute résolution : THR) et que le milieu observé est complexe (couvert forestier). Dans ce cas, l'utilisation d'un modèle utilisant une représentation tridimensionnelle réaliste du paysage est indispensable.

Le besoin de simulations plus performantes et les techniques d'acquisition d'images de plus en plus complexes expliquent les nombreux efforts des scientifiques pour développer des modèles physiques précis et robustes. Une contrainte majeure est que ces modèles devraient être faciles à utiliser et requérir peu de ressources informatiques. Cette remarque situe le cadre dans lequel le modèle DART a été développé au CESBIO. Ce modèle simule les images de télédétection et le bilan radiatif d'un paysage terrestre hétérogène. Pour cela, il modélise de manière précise toute la chaîne de mesure "Paysage - Atmosphère - Capteur", pour tout paysage naturel et urbain, avec ou sans relief et atmosphère. Le paysage est simulé en tant que matrice de cellules rectangulaires, combinée à une distribution spatiale d'éléments plans opaques (triangles, parallélogrammes). Le T-R est simulé avec une méthode de suivi de rayons itérative (*i.e.*, diffusion du rayonnement intercepté à l'itération précédente) où les rayons ne se propagent que selon un nombre fini de directions (*e.g.* 150).

Le modèle DART initial (1996) traitait uniquement des paysages naturels (*i.e.* forêt, prairie, *etc*.) sans atmosphère, sans émission thermique. Depuis, il a été beaucoup testé et amélioré : émission thermique de paysages naturels sans atmosphère (1999), modélisation des paysages urbains et de l'atmosphère en mode "réflectance" (2001), *etc*.

Ce travail de thèse a transformé le modèle DART (brevet : PCT/FR 02/01181) en un modèle multispectral qui simule des images de télédétection optique de tout type de paysage terrestre (naturel ou artificiel), pour toute altitude et résolutions spatiales du capteur spatial/aéroporté. Les principales fonctionnalités et améliorations introduites sont indiquées ci-dessous.

Résumé

1) *Modélisation du paysage*

- Modélisation des couverts forestiers beaucoup plus réaliste grâce à la simulation des éléments ligneux (troncs, branches, brindilles) et leur agrégation, en accord avec les processus éco-physiologiques de l'arbre. Cette évolution a impliqué l'introduction des cellules "multi-espèces" et mixtes, contenant plusieurs éléments turbides (feuilles, brindilles) et éléments plans.
- Simulation de vastes paysages (parcelles agricoles et/ou zones urbaines) plus précise et opérationnelle à partir de cartes d'occupation du sol et/ou de bases de données.
- Nouvelle modélisation des paysages urbains.

2) *Modélisation du T-R*

- Modélisation multispectrale sur tout le domaine optique, du visible à l'infrarouge thermique.
- Modélisation du T-R dans les cellules "multi-espèces" et "mixtes".
- Modélisation d'images de paysages répétitifs avec continuité du relief (*e.g.* pentes infinies).
- Modélisation du T-R (diffusion/émission) dans les cellules "air" du paysage.
- Modélisation des images dans le plan du capteur.
- Amélioration de la modélisation des diffusions multiples.
- Amélioration de la modélisation de l'émission thermique atmosphérique.
- Amélioration de la modélisation de l'émission thermique des paysages terrestres.

3) *Multi-simulations et inversion*

Approche opérationnelle qui (1) lance de multiples simulations avec variation des paramètres d'entrée (LAI, réflectance du sol, etc.), et (2) inverse des images de télédétection.

4) *Amélioration du code et de l'interface Homme Machine (IHM) de DART*

Le code (plus de 100 000 lignes en langage C, C++, Java) et l'IHM ont été fortement améliorés (robustesse, XML, temps de calcul et mémoire informatique), en collaboration avec la société Magellium, en charge de la ré-ingeneering du code, dans le cadre d'un contrat CNES. Ainsi, une version professionnelle de DART, version compatible Unix/Linux/Windows, est désormais disponible.

Ce nouveau modèle a été utilisé et testé avec succès : inter comparaison de modèles (expérience RAMI-3 du Centre Commun de Recherche, Italie) et comparaison avec des mesures terrain et avion (République Tchèque). *In fine*, ce modèle a été appliqué pour l'extraction du LAI d'une forêt de conifères avec des images THR d'un capteur hyperspectral aéroporté. L'introduction des éléments ligneux dans la modélisation des arbres et du T-R associé s'est avérée améliorer nettement l'estimation du LAI.

Mots Clés : Modèle 3-D, transfert radiatif, télédétection, très haute résolution spatiale, capteur hyperspectral, satellite, inversion, végétation, LAI, réflectance.

Résumé (< 1000 caractères) :

En télédétection optique, les modèles de transfert radiatif (T-R) ont pour but de simuler la mesure radiométrique des capteurs spatiaux qui observent le système "Terre - Atmosphère". La modélisation des mesures de couverts végétaux est en général limitée au niveau de la représentation du paysage et du T-R associé. Cette thèse a permis de transformer le modèle 3-D de T-R DART (brevet : PCT/FR 02/01181) en un modèle multispectral simulant les images de télédétection optique (thermique inclus) de tout paysage urbain et naturel, avec relief et atmosphère, pour tout capteur spatial/aéroporté. Ce nouveau modèle a été validé par comparaison avec d'autres modèles (expérience RAMI-3, Centre Commun de Recherche, Italie) et avec des mesures *in situ* et aéroportées (République Tchèque). *In fine*, une méthode d'inversion a été développée. Elle a permis d'utiliser DART pour évaluer l'impact de la modélisation sur l'extraction du LAI d'une forêt de conifères avec des images hyperspectrales THR.

Abstract (< 1000 characters) :

In optical remote sensing, radiative transfer (R-T) models aim to simulate radiometric measurement of spatial sensors that spot "Landscape-Atmosphere" system. The modeling of vegetation canopies measurements is generally limited to landscape representation and R-T modeling. This thesis allowed transforming a 3-D R-T model DART (patent : PCT/FR 02/01181) to multispectral model simulating optical remote sensing images (thermal infrared included) of any natural and urban landscape with relief and atmosphere for any spatial/airborne sensor. This new model was validated by models intercomparison (RAMI-3 experience, Joint Research Centre, Italy) and with *in situ* and airborne measurements (Czech Republic). *In fine*, an inversion method was developed. It allowed using DART for evaluating the modeling impact on LAI estimation of coniferous forest using hyperspectral VHR images.

SOMMAIRE

ACRONYMES…...……...……...1

GLOSSAIRE……..……....2

INTRODUCTION.…….....7

I PRINCIPES PHYSIQUES DE DART 11

I.1 Introduction 12

I.2 Modélisation du paysage et du transfert radiatif.....12

I.2.1 Modélisation du paysage 12

I.2.2 Modélisation du transfert radiatif 20

I.2.3 Base de données atmosphériques 25

I.2.4 Modélisation des images dans le plan du capteur 27

I.3 Diffusion et Émission des milieux Opaques 32

I.3.1 Mécanismes de diffusion 32

I.3.2 Mécanismes d'émission 36

I.3.3 Point origine du rayonnement diffusé ou émis 37

I.3.4 Suivi de rayon diffusé ou émis 38

I.4 Diffusion et Émission des milieux Turbides et Mixtes 39

I.4.1 Transmission et Interception du rayonnement 40

I.4.2 Diffusion volumique d'une cellule turbide 43

I.4.3 Diffusion d'une cellule turbide 45

I.4.4 Diffusion d'une cellule mixte 51

I.4.5 Principes de l'émission thermique 54

I.4.6 Émission d'une cellule turbide "Air" 55

I.4.7 Émission d'une cellule turbide de végétation 56

I.4.8 Émission d'une cellule mixte 61

I.5 Modes de fonctionnement et Produits DART 63

I.5.1 Présentation 63

I.5.2 Etapes majeures d'une simulation 67

I.5.3 Mode (T) 73

I.5.4 Produits DART atmosphériques en mode (R) 75

I.5.5 Produits atmosphériques en mode T ou "R + T" 76

I.5.6 Produits de DART 77

II TESTS DE VALIDATION ET COMPARAISONS 81
II.1 Introduction 82
II.2 Rayonnement solaire reflechi 82
II.2.1 Présentation 82
II.2.2 Détection des imprécisions 84
II.2.3 Imprécisions barycentriques 89
II.2.4 Imprécisions de la représentation des diffusions multiples 92
II.2.5 Solutions retenues 94
II.2.6 Validation des améliorations 95
II.3 Émission thermique 97
II.3.1 Présentation 97
II.3.2 Milieu "sol + végétation" isotherme 97
II.3.3 Milieu "sol + végétation" non isotherme 103
II.4 Conclusion partielle 105

III INFLUENCE DES ÉLÉMENTS LIGNEUX SUR LA RÉFLECTANCE DU SAPIN DE NORVÈGE 107
III.1 Introduction 108
III.2 Matériels et méthode 111
III.2.1 Site d'étude 111
III.2.2 Méthodologie 112
III.2.3 Mesures terrains et traitement des données 113
III.2.4 Images hyperspectrales AISA et prétraitement 117
III.2.5 Comparaison FRD DART vs. FRD AISA 119
III.2.6 Indices de végétation (NDVI, AVI, GEMI) et directionnel (HDS) 119
III.3 Résultats et validations 121
III.3.1 Paramétrisation de la forêt de conifères dans DART 121
III.3.2 Validation des FRD DART 125
III.4 Influence des éléments ligneux dans le houppier 128
III.4.1 Comparaison des FRD 128
III.4.2 Relation indices de végétation - LAI 138
III.4.3 Conséquences sur l'inversion du LAI 144
III.5 Conclusion partielle 145

IV INVERSION DE DART POUR L'EXTRACTION DE PARAMÈTRES BIOPHYSIQUES 147
IV.1 Introduction 148
IV.2 Généralités sur le processus d'inversion.....150
IV.3 Méthode d'inversion multispectrale.....152
IV.3.1 Maquettes pour la génération des LUT 153
IV.3.2 Saisie des paramètres 155
IV.3.3 Représentation des FRD par un modèle analytique 157
IV.3.4 Inversion des paramètres libres (P) 157
IV.3.5 Organigramme de la procédure d'inversion 158
IV.4 Matériels et méthode 160
IV.4.1 Données disponibles 160
IV.4.2 Objectifs de l'étude 161
IV.4.3 Méthodologie 162
IV.5 Résultats et discussion.....165
IV.5.1 Impact du schéma d'inversion : Données non bruitées 165
IV.5.2 Impact du schéma d'inversion : Données bruitées 166
IV.5.3 Inversion des données AISA 168
IV.6 Conclusion partielle.....172

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES……..……....173

ANNEXE A : Exemples de simulations DART…….……...…177

BIBLIOGRAPHIE…….……..…….…..183

AISA	Airborne Imaging Spectroradiometer for Applications (Spectroradiomètre imageur aéroporté)
ASCR	Académie des Sciences de République Tchèque
AVI	Angular Vegetation Index (Indice de végétation angulaire)
BA	Basse Atmosphère
BOA	Bottom Of the Atmosphere (Bas de l'Atmosphère)
CC	Crown Coverage (Taux de couverture arborée [%])
CESBIO	Centre d'Études Spatiales de la BIOsphère
CNES	Centre National d'Études Spatiales
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
DART	Discrete Anisotropic Radiative Transfer
DARTMC	DART Monte Carlo
fAPAR	Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation
FOV	Field Of View (Angle d'ouverture [°])
FRD	Facteur de Reflectance Directionnelle
GEMI	Global Environment Monitoring Index
HA	Haute Atmosphère
HDS	Hot Dark Spot Index
IHM	Interface Homme Machine
IRT	InfraRouge Thermique (3 - 100µm)
LAD	Leaf Angle Distribution (Distribution angulaire foliaire)
LAI	Leaf Area Index (Indice foliaire : m^2 de feuilles par m^2 de surface au sol)
LUT	Look Up Table (Table vidéo)
MA	Moyenne Atmosphère
MIR	Moyen InfraRouge (1.2 - 3µm)
MNT	Modèle Numérique du Terrain
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
PAI	Plant Area Index (LAI + WAI : m^2 de "feuilles + bois" par m^2 de surface au sol)
PIR	Proche InfraRouge (0.7 - 1.2µm)
POLDER	POLarization and Directionality of Earth Reflectances
RAMI	RAdiation transfer Model Intercomparison
RE	Red Edge (0.68 - 0.74µm)
RMSE	Root Mean Square Error (Erreur quadratique moyenne)
SAIL	Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves (Modèle de réflectance 1D de couvert végétal)
SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre
TAI	Twig Area Index (m^2 de brindilles par m^2 de surface au sol)
THR	Très Haute Résolution Spatiale
TOA	Top Of the Atmosphere (Haut de l'Atmosphère)
T-R	Transfert Radiatif
UPS	Université Paul Sabatier
VIS	Domaine spectral du Visible (0.4 - 0.7µm)
WAI	Wood Area Index (Indice de bois : m^2 de bois par m^2 de surface au sol)

Notations angulaires

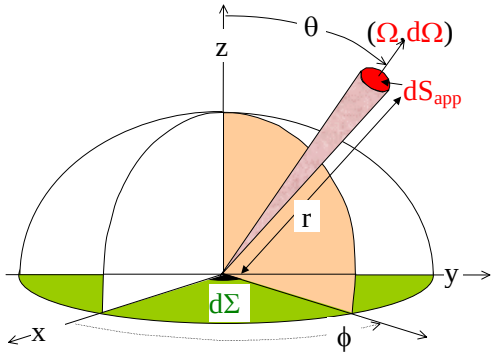
Ω Direction dans l'espace.

(θ, φ) Angles zénithal et azimutal dans le système d'Euler avec $\theta \in [0\ \pi]$ et $\varphi \in [0\ \ 2\pi]$.

ψ_{ij} Angle entre deux directions Ω_i et Ω_j .

dΩ Angle solide (sr)

En appelant dS la surface de la sphère de rayon r couverte par dΩ, centré sur Ω(θ,φ), on a : $d\Omega = \sin\theta.d\theta.d\phi = \frac{dS}{r^2}$, où $\int_0^{2\pi} d\phi . \int_0^{\pi/2} \sin\theta.d\theta = 2\pi$.



Grandeur énergétique commune à la réflexion et à l'émission

Luminance énergétique : L_Σ [$W.m^{-2}.sr^{-1}$]

Flux énergétique (puissance) par unité d'angle solide (dΩ) et de surface apparente (dS_{app}) selon une direction donnée (Ω). dS_{app} (=dΣ.cosθ) est la projection dans le plan normal à (Ω) de la surface dΣ de la source Σ, qui selon le cas est une surface interceptrice ou émettrice/diffusante.

Σ est dite homogène si L_Σ est constante en tout point. Elle est dite isotrope si L_Σ est indépendante de (Ω), pour la diffusion ou l'émission. Dans ce cas, l'exitance énergétique M_Σ ($W.m^{-2}$) *i.e.*, la puissance par unité de surface dΣ est : $M_\Sigma = \pi.L_\Sigma$

Définitions relatives à la réflexion

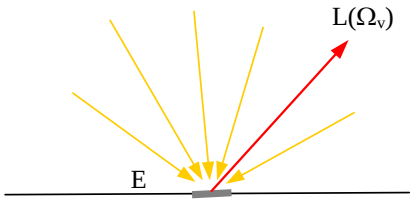
Éclairement énergétique : E [$W.m^{-2}$]

Puissance reçue par une surface unitaire (dΣ). L'éclairement de dΣ associé à un rayonnement de luminance isotrope s'écrit : $E_\Sigma = \pi.L_\Sigma$

Facteur de Réflectance Directionnelle : FRD ou ρ

Rapport de la luminance (L) réfléchie par une surface selon la direction Ω_v, à la luminance qui serait réfléchie (L_{lamb}) par une surface de référence (blanche lambertienne) recevant le même éclairement *E*. Vu que pour une surface blanche lambertienne $L_{lamb} = E/\pi$, on a alors :

$$FRD(\Omega_s,\Omega_v) = \rho(\Omega_s,\Omega_v) = \frac{L(\Omega_s,\Omega_v)}{L_{lamb}} = \pi\frac{L(\Omega_s,\Omega_v)}{E}$$



Le FRD, appelé aussi simplement réflectance, mesure la capacité d'une surface à réfléchir l'énergie incidente. Il dépend de la longueur d'onde (λ), de la distribution directionnelle de l'éclairement incident et de la direction de visée. Il est dit hémisphérique ou directionnel selon que le cône d'éclairement/diffusion est infinitésimal ou hémisphérique.

Albédo sphérique spectral : $\rho_{h,h}$

Fraction du rayonnement spectral incident réfléchi par une surface horizontale sur un intervalle spectral (Δλ) :

$$\rho_{h,h}(\Delta\lambda) = \frac{1}{\pi}.\int_{\Delta\lambda}\int_{2\pi} \rho(\lambda,\Omega_i,\Omega_v).\cos\theta_v.d\Omega_v.d\lambda$$

Définitions relatives à l'émission

Émissivité : ε(λ,Ω,ΔΩ)

Rapport de l'énergie spectrale émise selon (Ω,ΔΩ) par un objet de température T sur la luminance émise par un corps "parfait" à la même température. Ce dernier est noté corps noir *i.e.*, un corps qui absorbe tout le rayonnement et qui réémet sans perte.
L'émissivité donne l'efficacité d'émission d'un milieu selon (Ω,ΔΩ) par rapport au corps noir. Elle est qualifiée de directionnelle $\varepsilon_d(\lambda,\Omega)$ ou d'hémisphérique $\varepsilon_h(\lambda)$, selon que ΔΩ est infinitésimal ou égal à 2π.

Loi de Planck

La luminance spectrale $L_B(\lambda,T)$, *i.e.* luminance énergétique par unité de longueur d'onde, du corps noir est isotrope et suit la loi de Planck:

$$\frac{\partial L_B(\lambda,T)}{\partial\lambda} = \frac{2h\lambda^{-5}.c^2}{[\exp(\frac{hc}{\lambda kT})-1]} \qquad (W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1})$$

où c est la vitesse de la lumière (= $2{,}997925.10^8$ ms^{-1}),
h est la constante de Planck (= $6{,}62618.10^{-34}$ J.s),
k est la constante de Boltzmann (= $1{,}38066.10^{-23}$ $J.K^{-1}$),

$h.\frac{c}{\lambda}$ est l'énergie des photons de fréquence $\nu = \frac{c}{\lambda}$

Température de brillance $T_B(\lambda,\Omega,\Delta\Omega)$

La température de brillance d'un milieu selon (Ω,ΔΩ) est obtenue par inversion de la loi de Planck, en considérant que le milieu observé est un corps noir. Elle est qualifiée de directionnelle $T_B(\lambda,\Omega)$ ou d'hémisphérique $T_B(\lambda)$, selon que ΔΩ est infinitésimal ou égal à 2π.

Glossaire général du modèle DART

$\boldsymbol{T(\Delta l_i,\Omega_n)}$	Transmittance selon Ω_n pour un trajet Δl_i dans la cellule i.
$\boldsymbol{\tau_p}$, $\boldsymbol{\tau_p^a}$, $\boldsymbol{\tau_p^e}$	Épaisseur optique totale, d'absorption et de diffusion des aérosols.
$\boldsymbol{\tau_m}$, $\boldsymbol{\tau_m^a}$, $\boldsymbol{\tau_m^d}$	Épaisseur optique totale, d'absorption et de diffusion des molécules.
$\boldsymbol{\alpha^a}$, $\boldsymbol{\alpha_m^a}$, $\boldsymbol{\alpha_p^a}$	Coefficient d'extinction par absorption total, molécules et aérosols.
$\boldsymbol{\alpha^d}$, $\boldsymbol{\alpha_m^d}$, $\boldsymbol{\alpha_p^d}$	Coefficient d'extinction par diffusion total, molécules et aérosols.
$\boldsymbol{\alpha^e}$, $\boldsymbol{\alpha_m^e}$, $\boldsymbol{\alpha_p^e}$	Coefficient d'extinction total, molécules et aérosols.
$\boldsymbol{\omega_p}$	Albédo de diffusion des aérosols.
$\boldsymbol{<T(j,\Omega_s,\Omega_v)>_{\Omega_s}}$	Fonction de phase moyenne de la cellule de type j selon Ω_v.
$<\boldsymbol{T_i}>$	Transmittance moyenne à partir du centre d'une cellule i (*cf.* diffusions multiples).
$\boldsymbol{a_p}$, $\boldsymbol{g_{1p}}$, $\boldsymbol{g_{2p}}$	Paramètres de la fonction de phase des aérosols.
$\boldsymbol{D(z)}$	Densité de molécules de l'air (molécules.m^{-3}).
$\boldsymbol{d_{H20}}$	Quantité de vapeur d'eau précipitable (cm atm).
$\boldsymbol{E_s(\Omega_s)}$	Constante solaire (W.m^{-2}).
$\boldsymbol{f(j, \Omega_s \rightarrow \Omega_v, \Omega_f)}$	Fonction de diffusion totale des éléments foliaires de type j et de normale (Ω_f) selon une direction incidente (Ω_s) et une direction de diffusion (Ω_v).
fAR	Fraction "Puissance absorbée par une couche / Puissance incidente sur la scène"
fIR	Fraction "Puissance incidente sur une couche / Puissance incidente sur la scène"
$\boldsymbol{G(j, \Omega_n)}$	Facteur géométrique : proportion de surface foliaire de type j perpendiculaire à la direction (Ω_n).
$\boldsymbol{G(j,\Omega_f)/2\pi}$	Fonction de distribution normalisée des normales des cellules de feuillage de type j.
H	Hauteur de la "maquette + couche fictive" (m)
$\boldsymbol{H_p}$, $\boldsymbol{H_m}$	Facteur d'échelle des gaz et des aérosols.
i, I	Indice de cellule et nombre total de cellules élémentaires.
j, J	Indice du type de cellule (espèce) et nombre total de types.
k	Ordre d'itération du modèle DART (k = 0 : diffusion du flux solaire direct, etc.).
$\boldsymbol{M_s}$	"Point milieu", *i.e.* point origine du flux d'ordre 1 diffusé par une cellule "feuille".
n, $\boldsymbol{\aleph}$	Indice et nombre total de rayons incidents sur une cellule.
n, $\boldsymbol{N_{dir}}$	Indice et nombre total de directions discrètes de propagation: (Ω_n, $\Delta\Omega_n$), n $\in$ [1, N_{dir}].
$\boldsymbol{n_j}$	Indice de réfraction de la surface des éléments foliaires de type j.
$\boldsymbol{P(r,\Omega',\Omega)/4\pi}$	Fonction de phase.
$\boldsymbol{P(z)}$	(Pa) Pression atmosphérique.
$\boldsymbol{P_{O_3}}$	(atm) Pression partielle de l'ozone.
$\boldsymbol{s_{ATM}}$ **:**	Albédo sphérique de l'atmosphère calculé pour l'hémisphère descendant d'une surface fictive qui sépare le paysage terrestre de l'atmosphère.

s_f	Dimension foliaire équivalente pour le traitement du *hot spot*.
SKYL	Rapport des éclairements atmosphérique et totaux incidents sur la maquette.
s_{MA} :	Albédo sphérique de l'atmosphère seulement du à la moyenne atmosphère.
T_m^a	Transmittance des gaz absorbants.
T_1, T_2	Seuils d'arrêt énergétique des flux solaires incidents et des flux diffusés.
$T_d(j,\Omega_s,\Omega_v)$	Fonction de diffusion totale d'une cellule de type j.
T_{eau}	Transmittance de l'eau.
$T_m(\psi_{i,o})$, $T_p(\psi_{i,o})$	Fonction de diffusion totale des molécules et des aérosols.
u_f	(m^{-1}) Densité volumique foliaire.
U_{H_2O}	($g.cm^{-2}$) Masse d'eau (g) sur une colonne atmosphérique de 1 cm^2 de section.
U_{O_3}	(cm atm) Contenu total en ozone de l'atmosphère.
$W(\Omega_n)$	Flux total sortant de la cellule selon Ω_n.
$\mathcal{W}_1(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$	Diffusion d'ordre 1 totale, "df" et "nf" dans la cellule depuis M_s.
$W_1(\Delta l_i,\Omega_S\rightarrow\Omega_v)$	Diffusion d'ordre 1 sortant de la cellule i.
$\mathcal{W}_{1,int}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$	Flux $\mathcal{W}_1(\Delta l_i,\Omega_S\rightarrow\Omega_v)$ intercepté lors de la sortie d'une cellule i.
$W_{BOA}(i,j,\Omega_n)$	Rayonnement atmosphérique diffus BOA sur un pixel de coordonnées (i,j).
$W_{BOA}(i,j,\Omega_s)$	Rayonnement solaire direct BOA sur un pixel de coordonnées discrètes (i,j).
$W_{diff}(i,\Omega_v)$	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
$W_M(\Delta l_i,\Omega_S)$	Diffusions multiples sortant d'une cellule i.
$W_{out}(z=H,\Omega_v)$	Flux sortant de la maquette selon Ω_v.
$W_{TOA}(i,j,\Omega_s)$	Rayonnement solaire direct TOA sur un pixel de coordonnées discrètes (i,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).
DX, DY, DZ	Dimensions de la maquette du paysage terrestre selon les axes (Ox), (Oy), (Oz).
$(\Delta X_{HA},\Delta Y_{HA}, \Delta Z_{HA})$	Dimensions des cellules de la haute atmosphère.
$(\Delta X_{MA},\Delta Y_{MA}, \Delta Z_{MA})$	Dimensions des cellules de la moyenne atmosphère.
(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.
μ_n, μ_s, μ_v	Cosinus des angles zénithaux θ_n, θ_s et θ_v.
$\Delta\Omega_n$, $\Delta\theta_n$, $\Delta\phi$	Angle solide (sr), largeur zénithale (°) et largeur azimutale (°) de (Ω_n).
Ω_s, Ω_v	Direction de l'éclairement solaire direct et direction de visée.

$\alpha(\mathbf{r},\Omega)$	Coefficient d'extinction dans la direction (Ω).
$\alpha(\Omega_s,\Omega_v,\delta_{si})$	Coefficient d'extinction avec prise en compte de l'effet *hot-spot*, à une distance δ_{si} du point milieu.
$\alpha_d(\mathbf{r},\Omega' \rightarrow \Omega)$	Section efficace de diffusion différentielle au point r, pour un angle solide unité et selon (Ω).
ρ_{dj}, τ_{dj}	Réflectance et transmittance hémisphériques des éléments foliaires de type j.
ρ_{sol}, ρ_t, ρ_b	Réflectances hémisphériques des cellules de type "sol", "tronc", "branche".
ω_j, ω_{dj}, ω_{sj}	Albédo moyen, de diffusion et spéculaire des éléments foliaires de type j.

INTRODUCTION

La télédétection spatiale dans le domaine "optique" est désormais une technique indispensable pour l'étude de la Biosphère Continentale, du fait de sa capacité à fournir des informations synoptiques à différentes échelles spatio-temporelles. Toutefois, les systèmes de la végétation terrestre, ainsi que les processus de la Biosphère et de ses intéractions avec le rayonnement solaire étant tellement complexes et liés, que leur étude nécessite des méthodes d'analyse des mesures acquises par télédétection, toujours plus précises et innovantes. Il est en particulier important de relier le plus finement possible ces mesures, avec les paramètres d'intérêt des surfaces terrestres. C'est notamment le cas d'un paramètre tel que l'indice foliaire (LAI). En effet, ce paramètre caractérise la biomasse végétale, et de ce fait joue un rôle clef pour simuler le fonctionnement des surfaces végétales terrestres.

Le lien "Mesures de télédétection – Paramètres de Surface" est souvent établi à partir de régressions statistiques entre des mesures terrain des paramètres recherchés et des indices spectraux dérivés des mesures de télédétection (Tucker,1979; Pinty & Verstraete, 1992; Bannari et al., 1995; Broge et Leblanc, 2001; Haboudane et al., 2002). En fait, cette méthode n'est pas vraiment opérationnelle et robuste en raison des deux contraintes suivantes : elle nécessite des mesures terrain et elle n'est valide que pour la configuration d'observation concernée.

Les modèles physiques, qui simulent la mesure des capteurs, permettent d'apporter une solution à ce problème par le biais de leur utilisation en mode "inverse" (Myneni & Ross, 1991; Verstraete et al., 1996; Estève, 1998; Kimes et al., 2000; Weiss et al., 2000; Gastellu-Etchegorry et al., 2003; Gascon et al., 2004; Meroni et al., 2004; Atzberger, 2004; Schlerf & Atzberger, 2006). Il existe une grande variété de modèles physiques. D'une manière générale, ils ont des qualités et des défauts qui vont de pair. Ainsi, les modèles simples sont souvent peu précis mais opérationnels (*i.e.*, faible temps de calcul, faible nombre de paramètres d'entrée, *etc.*), alors que les modèles complexes sont conçus pour être précis et robustes, mais au détriment de leur opérationnalité. Parmi les principales limitations des modèles physiques pour simuler les mesures de télédétection (*i.e.*, facteur de réflectance et/ou température de brillance), il convient de signaler :

- *Modélisation incomplète de la mesure* : les modèles simulent en général uniquement le signal en entrée d'un capteur qui serait situé au-dessus du paysage étudié. Dans ce cas, le modèle ne simule ni la réponse impulsionnelle du capteur ni le transfert radiatif (T-R) atmosphérique, même s'il prend en compte l'éclairement atmosphérique. La solution consistant à coupler le modèle physique avec un modèle T-R atmosphérique est souvent difficile à mettre en oeuvre, sinon impossible, en raison du phénomène de couplage radiatif entre l'atmosphère et les surfaces terrestres. En fait, il existe des modèles couplés qui simulent de manière très précise le T-R atmosphérique, avec cependant une représentation très peu précise des surfaces terrestres. Ainsi, certains modèles simulent les paysages par une simple surface opaque plane

sans relief (MODTRAN de Berk et al.,1989 ; 6S de Vermote et al., 1996) ou avec relief (MOSART de Cornette et al., 1994; AMARTIS de Miesch, 1999; MYSTIC de Mayer et al., 2001).

- *Modélisation de mesures ponctuelles* : la quasi totalité des modèles simule les mesures de télédétection en tant que mesures ponctuelles, ce qui est une sérieuse limitation, car la prise en compte du contexte spatial dans les images de télédétection est souvent très utile pour leur analyse. D'autre part, la non simulation d'images est une contrainte pour simuler des images effectivement acquises par un capteur, compte tenu de la nécessité d'utiliser la fonction de transfert du capteur.
- *Représentation peu réaliste du paysage* : de nombreux modèles (Verhoef, 1984 ; Verstraete et al., 1990; Kuusk, 1995a-1995b; Gobron et al., 1997a) négligent l'hétérogénéité des surfaces terrestres ou ne la prennent en compte que de manière très imprécise. Pour ces modèles 1-D, le paysage étudié est souvent modélisé en tant que milieu turbide, alors que la mesure est modélisée à partir d'équations physiques du rayonnement, combinées à des paramètres de calage chargés de représenter l'hétérogénéité du paysage. Ceci explique en partie l'imprécision de ces modèles, car l'hétérogénéité des surfaces terrestres affecte fortement leurs mesures par télédétection spatiale optique. En fait, les modèles complexes prennent en compte de manière plus ou moins réaliste l'hétérogénéité des surfaces terrestres : modèle *K-K* (Kimes & Kirchner, 1982), modèle *Flight* (North, 1996), modèle *Sprint* (Thompson & Goel, 1998) et modèle *Raytran* (Govaerts & Verstraete, 1998). Par contre, aucun de ces modèles ne simule les effets de l'atmosphère au sein du paysage, alors que ces effets peuvent être importants dans le cas de paysages de grandes dimensions. Pour les couverts forestiers, les méthodes de mesure du LAI intègrent toujours la présence du bois (Chen & Black, 1991; Kucharik et al., 1998; Jonckheere et al., 2004) alors que sa représentation dans les modèles géométriques (Strahler & Jupp, 1991; Li & Strahler 1992; Li et al., 1995), hybrides (Lacaze & Roujean, 2001) et de T-R 3-D, cités ci-dessus, est peu ou mal prise en compte.

Un autre intérêt des modèles physiques est de permettre d'évaluer des performances d'un capteur futur ou actuel, et ainsi contribuer à une meilleure conception et utilisation, pour toute configuration d'observation. Cette approche a déjà été utilisée par le CNES (Centre National d'Études Spatiales) avec une version préliminaire du modèle DART (Gascon, 2001) pour la conception du futur satellite à très haute résolution spatiale (THR) de la constellation *Pléiades.*

Le besoin de simulations plus performantes et les techniques d'acquisition d'images de plus en plus complexes (capteur multispectral, multidirectionnel), expliquent les nombreux efforts consentis par la communauté scientifique pour développer des modèles physiques précis et robustes. Une contrainte essentielle associée à ce développement est que ces modèles ne doivent pas requérir de trop importantes ressources informatiques et qu'ils doivent être faciles d'utilisation, même pour des personnes non spécialistes en télédétection, physique et informatique. Ces remarques situent le contexte dans lequel le modèle DART (Gastellu-Etchegorry et al., 1996) a été développé au CESBIO. Ce modèle simule les images de télédétection et le bilan radiatif d'un paysage terrestre hétérogène. Ce modèle a été conçu pour simuler de manière précise

l'ensemble de la chaîne de mesure "Paysage - Atmosphère - Capteur", pour tout type de paysage naturel et urbain, avec ou sans relief et atmosphère. Pour cela il modélise le paysage en tant que matrice de cellules rectangulaires, combinée à une distribution spatiale d'éléments plans opaques (triangles, parallélogrammes). Le T-R est simulé avec une méthode de suivi de rayons itérative (*i.e.*, le rayonnement intercepté à une itération est diffusé à l'itération suivante) dans laquelle les rayons ne peuvent se propager que selon un nombre fini de directions (*e.g.*, 150).

Le modèle DART initial (Gastellu-Etchegorry et al., 1996) traitait uniquement des paysages naturels (*i.e.* forêt, prairie, *etc.*) sans atmosphère, sans émission thermique. Depuis, il a été profondément amélioré. Ainsi, Guillevic (1999) a introduit une version préliminaire de la modélisation de l'émission thermique dans le cas de paysages naturels sans atmosphère. Par la suite, Gascon (2001) a introduit la modélisation des paysages urbains et de l'atmosphère en mode "réflectance". D'autre part, de nombreuses applications de DART ont été développées : étude de la texture d'images de couverts forestiers (Pinel & Gastellu-Etchegorry, 1998; Gastellu-Etchegorry et al., 1999) ; détermination de la concentration foliaire en chlorophylle par analyse du déplacement du "red edge" (Demarez, 1997) ; extraction de l'indice foliaire par inversion d'images SPOT (Estève, 1998; Gascon et al., 2004) ; modélisation de l'albédo de pixels Météosat (Duthoit, 2006) ; modélisation du bilan d'énergie (transfert radiatif combiné à la modélisation de l'évapotranspiration, convection, *etc.*) des flux gazeux au niveau du paysage terrestre (Belot, 2006), *etc.*

Mon travail de thèse a eu pour but de transformer le modèle DART en un modèle multispectral qui simule des images de télédétection optique de tout type de paysage terrestre (naturel ou artificiel), pour un capteur situé à une altitude quelconque et à toutes les résolutions spatiales des capteurs spatiaux/aéroportés actuels. Le souci de déboucher sur un modèle précis et réaliste m'a conduit à participer à différents travaux : inter comparaison de modèles dans le cadre l'expérience RAMI-3 lancée en 2005 (http://rami-benchmark.jrc.it/HTML/RAMI3/RAMI3.html) et comparaison avec des mesures terrain et avion (Malenovsky, Martin et al., 2006). Ces travaux ont mis en évidence certaines faiblesses et/ou limitations du modèle DART et m'ont amené à introduire de nouvelles fonctionnalités et/ou améliorations (brevet : PCT/FR 02/01181) :

1) *Modélisation du paysage*
   - Simulation des éléments ligneux (branches, brindilles) des arbres, ce qui a impliqué l'introduction de cellules "mixtes" contenant différents éléments (feuilles, brindilles, branches).
   - Simulation de grands paysages (parcelles agricoles) à partir de cartes d'occupation du sol.
   - Nouvelle modélisation des paysages urbains.

2) *Modélisation du T-R*
   - Modélisation multispectrale sur l'ensemble du domaine optique, du visible à l'infrarouge thermique.
   - Modélisation du T-R dans les cellules "mixtes". L'approche implique une représentation de la végétation avec de la matière turbide et des éléments plans (triangles, *etc.*).

- Modélisation d'images de paysages répétitifs, mais avec continuité du relief. Il est ainsi possible de simuler des paysages avec des pentes infinies.
- Modélisation du T-R (diffusion/émission) dans les cellules "air" du paysage.
- Modélisation des images dans le plan du capteur.
- Amélioration de la modélisation des diffusions multiples. L'approche implique une meilleure prise en compte de la directionalité des flux interceptés.
- Amélioration de la modélisation de l'émission thermique atmosphérique.
- Amélioration de la modélisation de l'émission thermique des paysages terrestres.

3) *Interface Homme Machine (IHM)*

Contribution au développement d'une IHM opérationnelle réalisé par la société Magellium, en collaboration avec le CNES. Elle permet à l'utilisateur d'entrer de manière interactive tous les paramètres d'entrée de DART, de visualiser la simulation du paysage et les images simulées.

4) *Amélioration du code de DART*

Le code (plus de 100 000 lignes en langage C, C++, Java) a été fortement amélioré dans le but de le rendre plus robuste, d'optimiser les temps de calcul et de réduire la mémoire informatique nécessaire à son fonctionnement. D'autre part, dans le cadre d'un contrat CNES, j'ai aussi fortement collaboré avec les ingénieurs de la société Magellium en charge de la ré-engeneering du code. Un résultat majeur est qu'une version professionnelle de DART, version compatible Unix/Linux/Windows, est désormais disponible.

Le premier chapitre de ce manuscrit présente les principes majeurs et les fonctionnalités du modèle DART. Cette description se veut la plus complète pour faciliter la compréhension du lecteur, compte tenu des nombreuses améliorations que j'ai apportées à la version disponible avant le début de ma thèse (Gascon, 2001).

Le deuxième chapitre présente différents travaux conduits pour tester la validité des améliorations apportées au modèle DART, à la fois au niveau de la réflectance et de l'émission thermique.

Le troisième chapitre concerne un travail réalisé à partir de mesures terrain et avion d'un site forestier en République Tchèque. Un objectif majeur a été de vérifier la précision de DART, ainsi que l'analyse de l'impact de l'hétérogénéité du couvert sur sa réflectance simulée à THR.
Le dernier chapitre décrit mes travaux sur l’extraction de paramètres biophysiques par inversion du modèle DART à l’aide d’images hyperspectrales THR.

I PRINCIPES PHYSIQUES DE DART

I PRINCIPES PHYSIQUES DE DART 11
I.1 Introduction 12
I.2 Modélisation du paysage et du transfert radiatif 12
I.2.1 Modélisation du paysage 12
I.2.2 Modélisation du transfert radiatif 20
I.2.3 Base de données atmosphériques 25
I.2.4 Modélisation des images dans le plan du capteur 27
I.3 Diffusion et Émission des milieux Opaques 32
I.3.1 Mécanismes de diffusion 32
I.3.2 Mécanismes d'émission 36
I.3.3 Point origine du rayonnement diffusé ou émis 37
I.3.4 Suivi de rayon diffusé ou émis 38
I.4 Diffusion et Émission des milieux Turbides et Mixtes 39
I.4.1 Transmission et Interception du rayonnement 40
I.4.2 Diffusion volumique d'une cellule turbide 43
I.4.3 Diffusion d'une cellule turbide 45
I.4.4 Diffusion d'une cellule mixte 51
I.4.5 Principes de l'émission thermique 54
I.4.6 Émission d'une cellule turbide "Air" 55
I.4.7 Émission d'une cellule turbide de végétation 56
I.4.8 Émission d'une cellule mixte 61
I.5 Modes de fonctionnement et Produits DART 63
I.5.1 Présentation 63
I.5.2 Etapes majeures d'une simulation 67
I.5.3 Mode (T) 73
I.5.4 Produits DART atmosphériques en mode (R) 75
I.5.5 Produits atmosphériques en mode T ou "R + T" 76
I.5.6 Produits de DART 77

I.1 INTRODUCTION

Le modèle DART simule simultanément dans plusieurs longueurs d'onde du domaine optique (de l'ultraviolet à l'infrarouge thermique) le bilan radiatif et des images de télédétection de tout paysage terrestre (naturel et/ou urbain, avec ou sans relief), pour toute direction solaire (Ω_s) et de visée (Ω_v), toute atmosphère, et toute FTM du capteur. Il a été conçu pour être précis, simple d'emploi et adapté à une utilisation opérationnelle. Pour cela, il modélise trois sous-systèmes :

- Le paysage terrestre;
- L'atmosphère (simulation optionnelle);
- Le capteur radiométrique spatial ou aéroporté (simulation optionnelle).

Ce chapitre décrit la représentation informatique des milieux sur lesquels DART opère, la méthode de résolution du transfert radiatif (T-R) et l'architecture informatique du modèle DART.

I.2 MODELISATION DU PAYSAGE ET DU TRANSFERT RADIATIF

I.2.1 Modélisation du paysage

● ***Discrétisation spatiale du paysage***

Le système "paysage terrestre - atmosphère" est le milieu de propagation du rayonnement. Sa représentation informatique est une matrice 3-D de cellules parallélépipédiques (*Figure I.1*), combinée à un maillage réalisé avec des triangles et des parallélogrammes. Elle est appelée ici maquette ou scène.

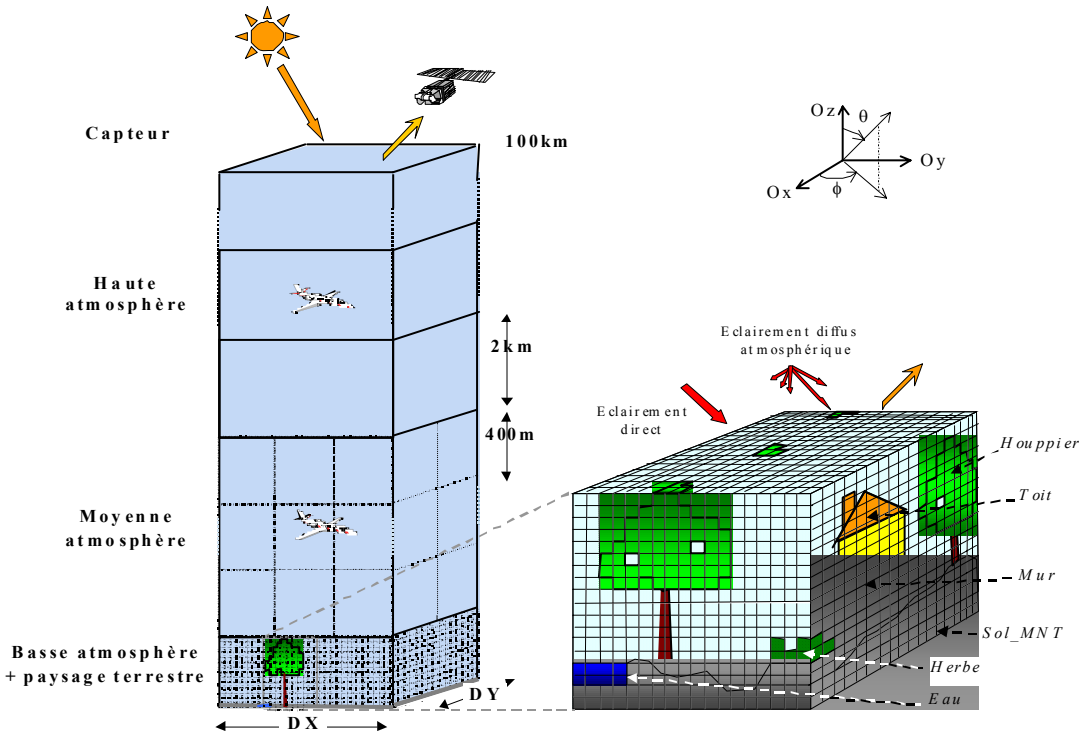


Figure I.1: Représentation schématique du système "Paysage terrestre – Atmosphère - Capteur".

La scène est constituée par la maquette du paysage terrestre, surmontée ou non par une maquette de l'atmosphère selon que le T-R atmosphérique est simulé ou non. Les cellules de la maquette terrestre sont

caractérisées par des dimensions "libres" (ΔX, ΔY, ΔZ), avec ΔZ qui peut différer de ΔX et ΔY pour optimiser l'échantillonnage spatial (vertical *vs.* horizontal) du paysage, et par un indice qui indique le type de la matière qu'elles contiennent. La maquette "atmosphère" est uniquement constituée de cellules "air", alors que la maquette "terrestre" peut comprendre des cellules "air" et des cellules associées à 5 types d'éléments (sol, végétation, eau, route, urbain), avec ou sans relief (MNT: Modèle Numérique de Terrain). Les dimensions de la maquette selon les axes Ox, Oy et Oz sont DX, DY et DZ.

La simulation de paysages hétérogènes implique en général de simuler de grandes scènes, avec de fortes contraintes en terme de volume mémoire (RAM) nécessaire, en particulier dans le cas de simulations à haute résolution spatiale. L'approche de Kimes & Kirchner (1982) est adoptée pour réduire ce problème : le T-R est simulé pour un paysage qui correspond à une juxtaposition infinie du paysage effectivement simulé (*Figure I.2*). D'un point de vue pratique, les rayons ne sont suivis que dans la maquette, mais tout rayon qui sort par un côté de la maquette rentre par le côté opposé, avec la même direction. Son décalage vertical est nul ou non suivant que le paysage simulé est exactement répétitif ou continu.

- *Paysage répétitif*. Sa représentation est réaliste si les bords opposés de la maquette ont des altitudes égales. Autrement, il est effectué une opération (*i.e.* régularisation du relief) qui ramène les bords opposés de la maquette à des altitudes égales (Handbook, 2006).

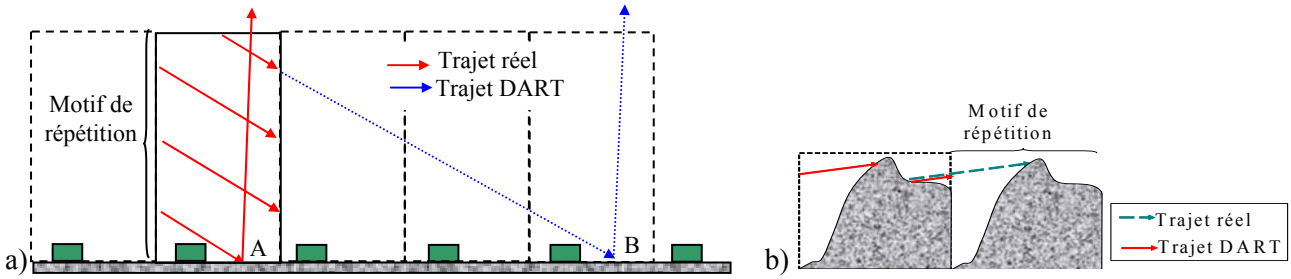


Figure I.2: a) Suivi de rayons dans un paysage infini répétitif (d'après Gascon, 2001). Trajet réel et trajet simulé dans la maquette DART. Les points A et B sont équivalents. b) Paysage répétitif.

- *Paysage continu répétitif*. Cette approche permet de simuler des pentes infinies, *etc.* (*Figure I.3*). Le relief est régularisé pour que les faces opposées aient le même relief à une translation près. Tout rayon qui sort de la maquette rentre dans celle-ci par la face opposée, avec la même direction et un décalage vertical égal au dénivelé entre la face de sortie et la face d'entrée.

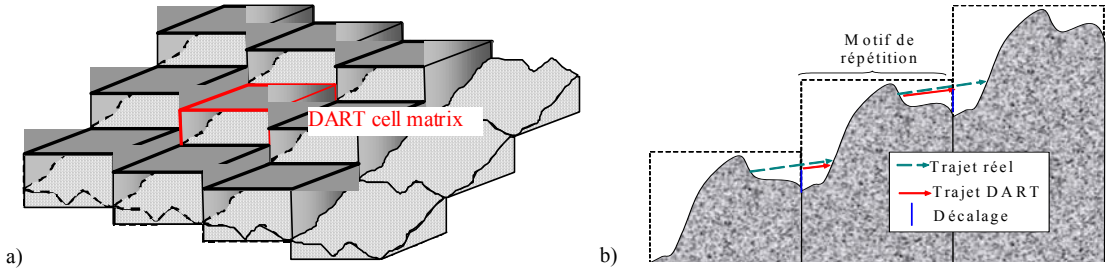


Figure I.3: a) Paysage infini avec continuité du relief. b) Suivi de rayon associé.

De plus, il est possible de simuler un paysage fini ou semi-infini (*e.g.* expérience de laboratoire) en "construisant" un mur sur tout ou partie du contour de la maquette terrestre.

- ***Types de paysages***

Le modèle DART opère sur des paysages naturels et/ou urbains, avec ou sans relief, et avec ou sans atmosphère. Le mode de représentation des éléments constitutifs de la scène dépend de leur nature. Ainsi, la végétation (*e.g.*, houppiers d'arbres et parcelles agricoles) est simulée en juxtaposant des cellules qui contiennent de la matière turbide. Cette matière, aussi appelée "milieu trouble", est un gaz d'éléments foliaires plans caractérisés par une distribution angulaire de leurs normales (LAD), une densité volumique u_f, une petite dimension ($d_f << \Delta X, \Delta Y, \Delta Z$) et des propriétés optiques. Par contre, les éléments urbains (*i.e.* murs et toits de maisons) et le bois (*i.e.* troncs, branches) sont simulés en tant que juxtaposition d'éléments opaques plans (*i.e.* triangles, parallélogrammes) caractérisés par une orientation et des dimensions spécifiques ainsi que par des propriétés optiques. La création des scènes est détaillée dans Handbook (2006). Seul, le mode de création des arbres est décrit dans ce manuscrit.

● ***Catégories de cellules***

Toute cellule de la maquette est "vide" ou appartient à une des 3 catégories suivantes :

1) **Cellules "turbides"**. Elles simulent les feuilles des couronnes d'arbre (*Houppier*), les rameaux et brindilles (*Twig*), la végétation homogène comme l'herbe (*Plot*) et l'air (*Air*). Elles sont remplies d'un milieu turbide (*i.e.* nuage d'éléments diffusants distribués selon la loi de Poisson) à l'origine d'interactions onde-matière volumiques (*Figure I.4*). Ces interactions sont modélisées avec un coefficient d'extinction (m^{-1}), une fonction de phase (%) et un albédo (%) volumiques, déduits des propriétés structurales (u_f, LAD) et optiques (réflectance ρ, transmittance τ) des éléments du milieu.

2) **Cellules "opaques"**. Elles simulent le sol sans (*Sol*) et avec (*Sol_MNT*) relief, les parcelles sans (*Plot_Opaque*) et avec (*Plot_MNT*) relief, l'eau sans (*Eau*) et avec (*Eau_MNT*) relief, la route sans (*Route*) et avec (*Route_MNT*) relief, les murs (*Mur*), les toits (*Toit*), les troncs d'arbre (*Tronc*) et les branches (*Branch*). Elles induisent des diffusions et émissions de surface qui surviennent sur leur face supérieure (cellule *Sol*, *Eau*, *Route, Plot_Opaque*) ou sur les figures planes (triangles, parallélogrammes) qu'elles contiennent pour tout ou partie (cellule *Sol_MNT*, *Plot_MNT, Eau_MNT, Route_MNT, Mur, Toit, Tronc, Branch*). Leur réflectance ρ_{dd} (émissivité : $\varepsilon_d = 1 - \rho_{dh}$) est simulée par des fonctions analytiques associées à 3 types de diffusion (c*f.* I.3.1).

3) **Cellules "mixtes"** : Elles peuvent contenir plusieurs types de milieux turbides (*i.e.*, matière avec différentes propriétés optiques et structurales) et/ou plusieurs figures planes.

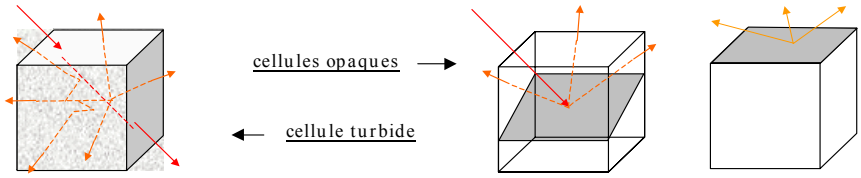


Figure I.4 : Diffusions volumiques (cellule turbide) et surfaciques (cellule opaque).

La simulation informatique du paysage "Terre + Atmosphère" simulé est constitué de 4 fichiers (c*f.* I.5) dont le fichier *mak* qui stocke la matrice rectangulaire du paysage où chaque cellule (Tableau I.1) est

repérée par un indice (Type) caractéristique du milieu représenté et *i* caractéristiques (C_i) optiques et/ou structurales (LAI, indice des figures qui traversent la cellule, *etc.*).

		Type	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	...	
	Vide	0	/	/	/	/	/		
	Air	1	Gaz*: coef. dif. ext. (x 1.2 10^9)	Aérosols*: coef. dif. ext. *(x* 1.25.10^7*)*	Gaz*: coef. absorp. ext. (*float*)	Aérosols*: coef. absorp. (*float*)	/		
Opaque_plat	***Sol***	2	Diffuseur type (0,1,2 or 3)	Index C2 of C1 in *coeff_diff.src*	/	/	/		
	Eau	3							
	Route	4							
	Plot_Opaque	13							
Opaque_MNT	***Sol_MNT***	7	Diffuseur type (0,1,2 or 3)	Indice C2 de C1 dans *coeff_diff.src*	Figure type: 0, 1, 2 ou 3	/	/		
	Eau_MNT	8							
	Route_MNT	9							
	Plot_MNT	14							
Urbain	***Mur***	10	Nb Figures	N° Figure 1	N° Figure 2	N° Figure 3	N° Figure 4	...	
	Toit et Branch	12							
	Tronc	11							
Opaque_nT	***Opaque_nT***	16	Nb de fonctions de phase folaire	LAI 1_{cell} (x 1000) ($\in$ [10^{-3} 65.535])	N° fonction de phase foliaire dans *coeff_diff.src*	LAI 2_{cell} (x 1000) ($\in$ [10^{-3} 65.535])	N°fonction de phase foliaire dans *coeff_diff.src*	...	Nb Figures etc.
T (turbide)	***Plot***	5	LAI_{cell} or TAI_{cell} (x 1000) ($\in$ [10^{-3} 65.535])	N°fonction de phase foliaire dans *coeff_diff.src*	/	/	/	/	/
	Houppier	6			/	/			
	Twig	15							
N_T	***N_T* (N_turbid)**	17	Nb de fonctions de phase folaire	LAI_{cell} (x 1000) ($\in$ [10^{-3} 65.535])	N° fonction de phase foliaire dans *coeff_diff.src*	LAI_{cell} (x 1000) ($\in$ [10^{-3} 65.535])	N°fonction de phase foliaire dans *coeff_diff.src*		

*Tableau I.1: Structure des cellules stockées dans le fichier mak. Codage 'unsigned short int'. Les fichiers * Prop_atmoBAq (BA) et Prop_atmoq (HA/MA) et non 'mak' stockent les valeurs des cellules 'Air'.*

Si le T-R atmosphérique est simulé, DZ = 100km car les gaz et aérosols atmosphériques sont surtout sous cette altitude. L'atmosphère est alors modélisée par la superposition de 3 matrices de cellules "air" :

a) Haute atmosphère (HA) : entre 4km et 100km, si BA<4km. $\Delta X_{HA} = DX$ et $\Delta Y_{HA} = DY$, $\Delta Z_{HA} = 2$km.

b) Moyenne atmosphère (MA) : de BA à 4km si BA<4km. $\{\Delta X_{MA} \equiv \Delta X, \Delta Y_{MA} \equiv \Delta Y\} < 100$m. $\Delta Z_{MA} = 400$m.

c) Basse atmosphère (BA) : cellules "air" au niveau du paysage terrestre, *i.e.* comprises entre le sol et l'altitude maximale du paysage. $\Delta X_{BA} = \Delta X$, $\Delta Y_{BA} = \Delta Y$ et $\Delta Z_{BA} = \Delta Z$.

La hauteur maximale du paysage terrestre peut dépasser 4km. Dans ce cas, l'atmosphère est simulée en décalant verticalement les matrices MA et HA sans modifier la taille de leurs cellules.

Le modèle DART comprend 4 modules majeurs (c*f.* I.5) : le module "direction" divise l'espace de propagation en secteurs angulaires contigus. Le module "phase" pré calcule les fonctions de phase. Le module "maket" construit la scène. Le module "dart" simule le transfert radiatif dans la scène.

● ***Modélisation des arbres***

La modélisation d'un paysage forestier 3-D inclue la distribution spatiale des arbres et leur conception.

- *Distribution spatiale des arbres*

Les arbres sont simulés en tout lieu (*Sol*, *Sol_MNT*, *Eau*, *etc.*) avec 3 types de distribution spatiale :

- *Option 1 : Lieu et dimensions exacts stockés dans un fichier texte.* Les caractéristiques de chaque arbre sont fixées : espèce (*j*), position (X, Y), hauteurs (*H*) du tronc et diamètres (*Ø*) sous ($H_{T,b}$[j], $Ø_{T,b}$[j]) et à l'intérieur ($H_{T,w}$[j], $Ø_{T,w}$[j]) du houppier, dimensions et forme du houppier.
- *Option 2 : Lieu exact et dimensions aléatoires*. Les paramètres structuraux sont définis par des variables gaussiennes. La position de chaque arbre est fixée par l'utilisateur.
- *Option 3 : Lieu et dimensions aléatoires.* Elle permet de créer une "forêt virtuelle" où les arbres ont une position aléatoire. Pour toute espèce (*j*), les dimensions du tronc et de la couronne sont des variables gaussiennes {moyenne, σ}. Les arbres ont une probabilité d'occurrence P_{tree} dans des disques de rayons (*r*) centrés sur tout ou partie des noeuds d'une grille (ΔX_{grid}, ΔY_{grid}) (Figure I.5). Ils sont distribués (1) sur toute la scène ou (2) dans une aire rectangulaire définie par ses 4 coins ou (3) au sein d'une sous zone elliptique de centre (X_o, Y_o) déterminée par l'intersection d'un plan horizontal et d'une gaussienne 3-D à une hauteur fixée par un seuil.

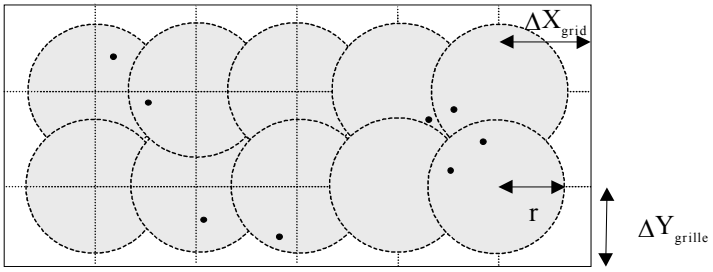


Figure I.5: Exemple de grille de distribution des arbres (•). Ici, P_{tree}=0.8.

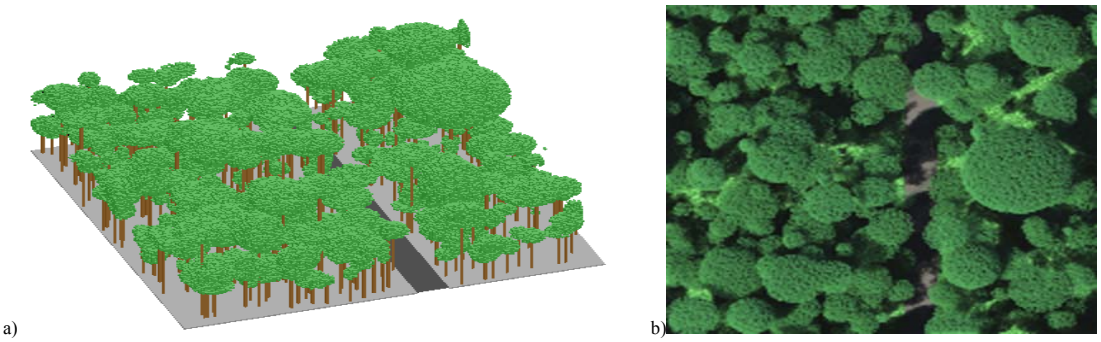


Figure I.6: a) Simulation de forêt (option 1). b) Image DART associée. θ_v=0°, θ_s=30°. 100x100 cellules.

- *Description des arbres*

Un arbre comprend un tronc et une couronne de hauteur {H_c[j], σ(H_c[j])} (options 2 et 3) ou {H_c[j]} (option 1). Celle-ci est divisée en *L* niveaux horizontaux de hauteur %h[j,l].{H_c[j], σ(H_c[j])} où %h[j,l] est la hauteur relative et $l \in [1 \quad L]$. Le tronc (*Figure I.7*) est la superposition de blocs parallélépipédiques (*i.e.* 4 rectangles verticaux et 1 carré horizontal). Sa partie basse est sous la couronne. Elle a des propriétés optiques $\rho_{T,b}$[j] ou $\varepsilon_{T,b}$[j] (réflectance ou émissivité de l'écorce parmi 3 diffuseurs *cf.* I.3.1), une hauteur $H_{T,b}$[j] et un diamètre $Ø_{T,b}$[j]. Sa partie haute est à l'intérieur de la couronne avec une possibilité de dépasser son sommet. Elle comprend L niveaux (blocs). Chaque niveau *l* est associé à $\rho_{T,w}$[j,l] ou $\varepsilon_{T,w}$[j,l], et un diamètre $Ø_{T,w}$[j,l] calculé à partir du diamètre relatif $\%Ø_{T,w}$[j,l]. Le calcul des dimensions des arbres diffère donc selon l'option de distribution des arbres :

- *Option 1*. En plus des descripteurs de forme de la couronne, le fichier texte stocke pour tout arbre : $H_{T,b}[j]$, $Ø_{T,b}[j]$, $H_{T,w}[j]$ et $Ø_{T,w}[j]$. La hauteur totale du tronc est : $H_{T,b}[j]+H_{T,w}[j]$. A tout niveau *l*, le diamètre du tronc est $Ø_{T,w}[j,l]=\%Ø_{T,w}[j,l]$. $Ø_{T,w}[j]$, où $\%Ø_{T,w}[j,l]$ est un paramètre d'entrée.
- *Options 2 et 3*. La hauteur totale du tronc est $H_{T,b}[j]+H_{T,w}[j].\frac{\{H_c[j],\sigma(H_c[j])\}}{H_c[j]}$. La proportionnalité "tronc - couronne" pour tout niveau l est assurée par $Ø_{T,w}[j,l]=\%Ø_{T,w}[j,l].Ø_{T,w}[j].\frac{\{Ø_{T,b}[j],\sigma(Ø_{T,b}[j])\}}{Ø_{T,b}[j]}$.

Cinq formes de couronne sont pré définies (Figure I.7) : ellipsoïde composé ou non, cône tronqué ou non, trapézoïde). Une forme est tronquée si $\Sigma_l\%h[l] < 1$. Elle englobe plusieurs éléments (troncs, branches, brindilles, feuilles, trous, *etc.*) qui peuvent être distribués de différentes manières pour simuler l'agrégation des branches et différentes zones de défoliation.

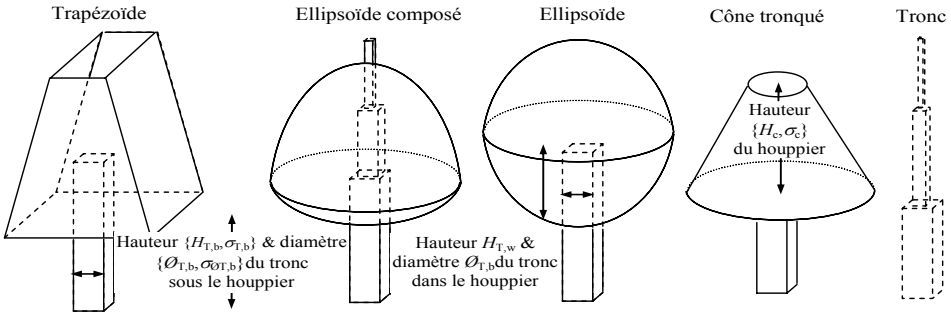


Figure I.7 : Formes schématiques 3-D de troncs et des couronnes.

- *Branches et brindilles :* Les branches du 1er ordre (*i.e.* branches directement issues du tronc) sont simulées comme des objets 3-D de forme pyramidale (*Figure I.8*) : 4 triangles centrés sur un axe prédéfini $\Omega_b(\theta_b,\varphi_b)$ reposant sur une base carrée Δr_b de sommets (A, B, C, D). L'origine de l'axe est fixée (1) horizontalement par la face du tronc et (2) verticalement par la hauteur relative *%b* par rapport à la partie haute du tronc, ce qui implique que la base de la branche s'inscrive dans le niveau *l*. La géométrie des branches est définie dans un fichier texte (Tableau I.2) spécifique à chaque espèce *j*. Le côté de la base vaut $\Delta r_b[j,l]=\%\Delta r_b[j].Ø_{T,w}[j,l]$, où $\%\Delta r_b[j]$ est un paramètre d'entrée. Le nombre de branches par niveau n'est pas limité. Leurs directions (Ω_b) sont quelconques. Leurs longueurs (Δl_b) et leurs extrémités (E_b) sont fixées par l'enveloppe extérieure du houppier (*Figure I.8*). Leurs propriétés optiques (réflectance $\rho_b[j]$ ou émissivité $\varepsilon_b[j]$ de l'écorce) sont associées aux 3 types de diffuseur (c*f.* I.3.1).

  D'autres éléments diffusants (*i.e.*, rameaux et brindilles) peuvent être simulés à l'intérieur d'un cylindre d'axe Ω_b et de rayon *rad* (m) autour des branches du 1er ordre. Ils sont simulés en tant que cellules turbides *Twig*, avec des propriétés optiques ($\rho_t[j,l]$, $\tau_t[j,l]$, *etc.*) et structurales (surface spécifique TAI[j] et/ou densité $u_t[j]$) ; distribution angulaire TAD[j], similaire au LAD).

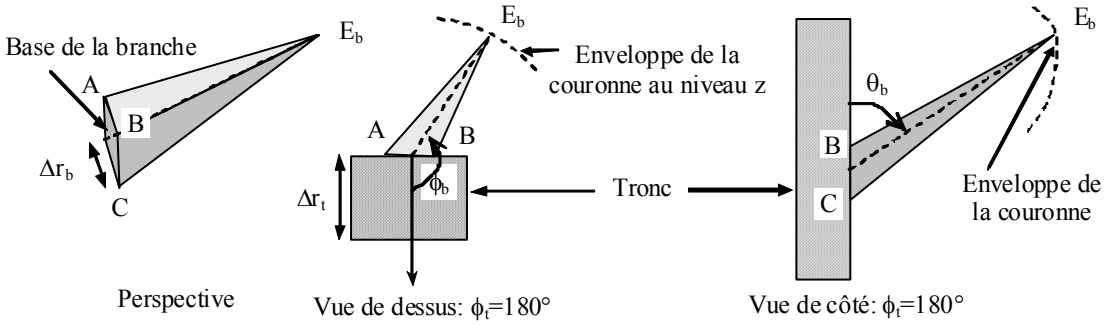


Figure I.8: Simulation de branche. Branche = 4 triangles centrés sur un axe pré-défini $\Omega_b(\theta_b,\Phi_b)$. La base de la branche est un carré (côté Δr_b) sur le tronc vertical. Chaque espèce d'arbre (j) a une distribution spécifique des branches spécifiée dans un fichier texte" branch.src".

Nombre total de branches : N_b (arbres d'espèce j)
Pour chacune des N_b branches
Face du tronc (avant : 2, droite : 3, arrière : 4, gauche : 5)
Hauteur relative origine *%b* par rapport à la base du tronc dans la couronne (⇒ niveau *l*)
Angles zénithal θ_b et azimutal ϕ_b (°)
Dimension relative $\%\Delta r_b$ du côté de la base (⇒ $\Delta r_b[j,l] = \%\Delta r_b[j].\varnothing_{T,w}[j,l]$)
Rayon du cylindre "*rad*" (m) pour la simulation des "rameaux + brindilles" autour des branches
Fin Pour les N_b branches

Tableau I.2: Fichier texte qui stocke la géométrie des branches des arbres d'espèce j.

- *Distribution foliaire relative.* Les propriétés optiques ($\rho_f[j,l]$, $\tau_f[j,l]$,...) et structurales des feuilles sont définies par niveau *l* de la couronne. Pour toute cellule (x,y,z), la densité volumique foliaire $u_{f,j}$ peut varier selon l'horizontale. Ainsi, $u_{f,j}$ est proportionnelle à une fonction linéaire à 4 paramètres (*Figure I.9*) qui croît entre les points $\alpha[j,l]$ et $\beta[j,l]$, est constante entre $\beta[j,l]$ et $\gamma[j,l]$ et décroît entre $\gamma[j,l]$ et $\kappa[j,l]$. De plus, la variabilité verticale est proportionnelle au w[j,l].

  * Couronnes axiales : $r(x,y,z) \in [0 \;\; \mathrm{Max}\{r(x,y,z)\}]$. Il est considéré la distance entre l'axe du tronc et le centre de la cellule traitée. Soit $r_a = \frac{r(x,y,z)}{\mathrm{Max}\{r(x,y,z)\}}$. On distingue 5 zones de variation de $u_{f,j}$.

  - $r_a \in [0 \;\; \alpha[j][\quad \Rightarrow u_f(j,x,y,z)=0$ avec
  - $r_a \in [\alpha[j,l] \;\; \beta[j,l][\quad \Rightarrow u_f(j,x,y,z)=w[j,l].w[j,l,x,y]$ avec $w[j,l,x,y]=\frac{r_a-\alpha[j,l]}{\beta[j,l]-\alpha[j,l]}$
  - $r_a \in [\beta[j,l] \;\; \gamma[j,l][\quad \Rightarrow u_f(j,x,y,z)=w[j,l]$
  - $r_a \in [\gamma[j,l] \;\; \kappa[j,l][\quad \Rightarrow u_f(j,x,y,z)=w[j,l].w[j,l,x,y]$ avec $w[j,l,x,y]=\frac{\kappa[j,l]-r_a}{\kappa[j,l]-\gamma[j,l]}$
  - $r_a \in [\kappa[j,l] \;\; 1] \quad \Rightarrow u_f(j,x,y,z)=0.$

  * Couronnes trapézoïdales : il est considéré les distances à ses axes horizontaux (x et y) : $r(x,y,z) \in [0; \mathrm{Max}\{r_x(x,y,z)\}]$ et $r(x,y,z) \in [\mathrm{Max}\{r_y(x,y,z)\}]$.

- Distribution des cellules *Vide* et *Air* du houppier. Elle est définie par le pourcentage de cellules pleines p[j,l] et 2 bornes relatives (a[j,l], b[j,l]). Pour un houppier homogène : $u_f[j,r]=1$. Autrement :

  - $r_a \in [0 \;\; a[j,l][$ ou $r_a \in]b[j,l] \;\; 1] \Rightarrow u_f(j,x,y,z)=0$
  - $r_a \in [a[j,l] \;\; b[j,l]] \quad \Rightarrow u_f(j,x,y,z)=0$ ou $u_f(j,x,y,z)=1$ (distribution aléatoire avec p[j,l])

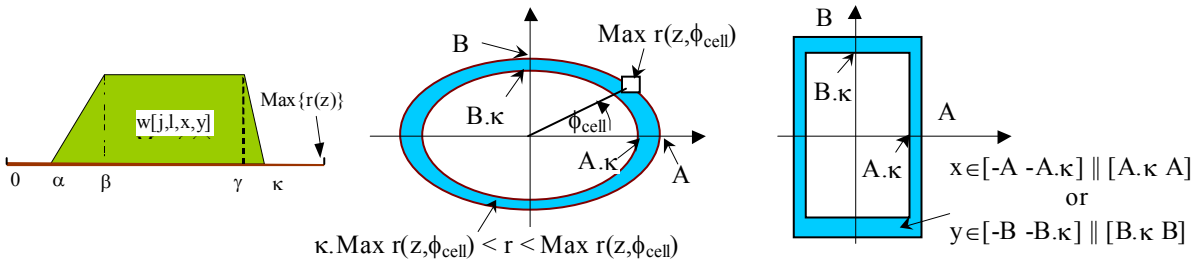


Figure I.9: Distribution horizontale w[j,l,x,y] de u_f pour des couronnes axiale et trapézoïdale. A et B sont les dimensions de la section horizontale de la couronne. Elles dépendent de l'altitude z. Dans le cas d'une couronne homogène, L = 1 et α[j,l] = β[j,l] = 0, γ[j,l] = κ[j,l] = 1.

- *Densité foliaire absolue :* elle est calculée en tant que LAI par cellule (LAI_{cell}), à partir de la densité volumique foliaire relative $u_f[j,r]$ et du LAI de l'espèce *j*. Ici, le LAI ($m^2.m^{-2}$) est défini comme le rapport de la moitié de la surface foliaire sur la surface totale de la scène. On a :

$$LAI[j] = \frac{\Sigma_l \Sigma_y \Sigma_x u_f[j,x,y,z].\Delta X.\Delta Y.\Delta Z}{DX.DY} \quad \text{(I-1)}$$

Par suite :
$$u_f[j] = \frac{LAI[j].DX.DY}{\Delta X.\Delta Y.\Delta Z.\{\Sigma_l \Sigma_y \Sigma_x w[j,l].w[j,x(l),y(l)]\}} \ (m^2.m^{-3}) \quad \text{(I-2)}$$

Le LAI assigné à chaque cellule repérée par (j,x,y,z) est :

$$LAI_{cell}[j,x,y,z] = u_f[j].w[j,l].w[j,x(l),y(l)].\Delta Z \quad \text{(I-3)}$$

L'application de la même procédure aux cellules *Twig*, en remplaçant dans (I-1) (I-2) et (I-3), les expressions de LAI[j], $u_f[j]$ et $u_f[j,x,y,z]$ respectivement par TAI[j], $u_t[j]$ et $u_t[j,x,y,z]$, donne :

$$TAI_{cell}[j,x,y,z] = u_t[j].w[j,l].w[j,x(l),y(l)].\Delta Z \quad \text{(I-4)}$$

De plus, la paramétrisation offre la possibilité de distribuer directement le u_f dans la cellule en spécifiant un LAI[j] et/ou TAI[j] négatif. Dans ce cas, $u_f[j]$ et $u_t[j]$ des expressions (I-3) et (I-4) sont respectivement égaux aux valeurs absolues de LAI[j] et TAI[j].

Lors de la construction des arbres, 2 cellules Houppier peuvent s'intersecter. Si la maquette ne peut contenir de cellules mixtes, alors la nouvelle cellule écrase l'ancienne cellule. Ce procédé permet de simuler le phénomène de répulsion naturelle (Franklin et al. 1985). Par contre, si la maquette peut contenir des cellules mixtes, alors les contenus des 2 cellules s'ajoutent.

Les cellules mixtes (*Tableau I.1*) permettent de simuler le cas où les cellules ont des dimensions supérieures à celles du bois (branches, rameaux, brindilles,...). Ces cellules contiennent uniquement des éléments turbides (*N_T* : "Twig + feuilles",...) ou des éléments turbides et opaques (*Opaque_nT* : "branches + feuilles", "branches + Twig",...). Dans les cellules *Opaque_nT*, les valeurs de u_f et u_t sont pondérées par un facteur 0.5 car environ 50% de feuilles et/ou de brindilles sont dans les branches. Les cellules mixtes sont bien adaptées aux couverts (*e.g.*, forêts boréales) avec un très fort niveau d'agrégation (aiguilles/rameaux/branches/houppier; Chen et al. 1996).

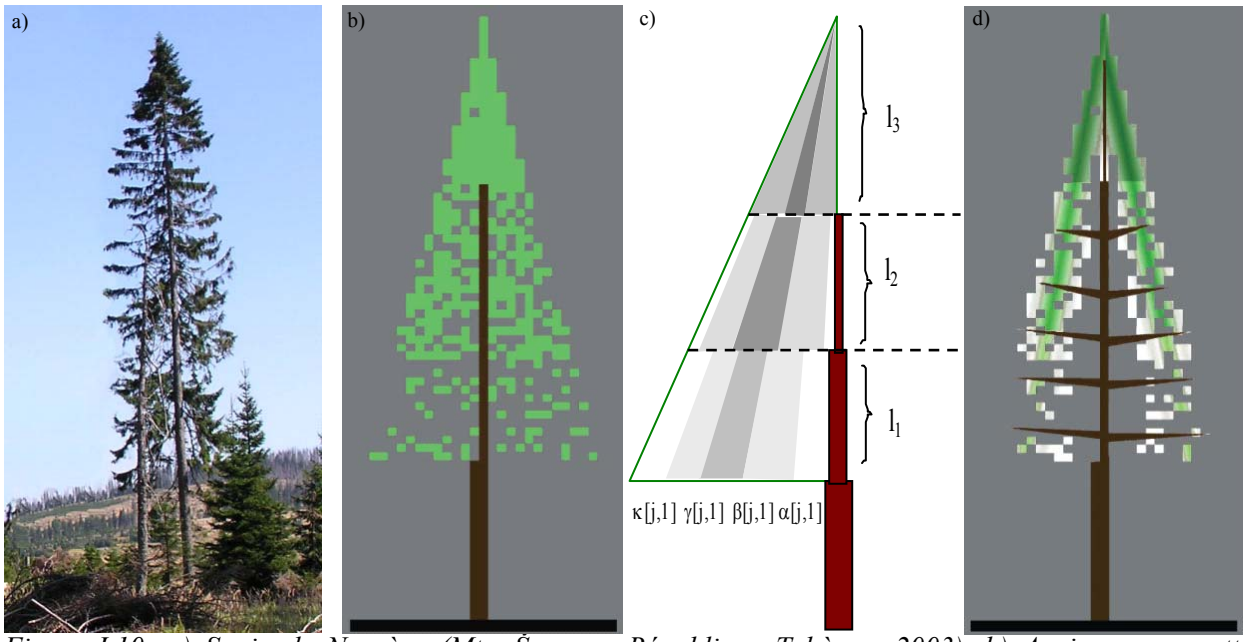


Figure I.10: a) Sapin de Norvège (Mts. Šumava, République Tchèque, 2003). b) Ancienne maquette DART. c, d) Nouvelle maquette DART avec branches et houppier à 3 niveaux.

I.2.2 Modélisation du transfert radiatif

● ***Aspects théoriques***

Les approches utilisées pour simuler le T-R diffèrent surtout à 2 niveaux : (1) représentation du milieu de propagation et (2) méthode mathématique de résolution. Ces deux niveaux sont en général liés. Les modèles T-R sont souvent divisés en 2 catégories associées aux 2 modes majeurs de représentation du paysage : représentation homogène ou hétérogène. Les modèles dits homogènes (Idso & de Wit, 1970; Ross, 1981; Verhoef, 1984-1998; Kuusk, 1995a-1995b, Myneni et al. 1989, Verstraete et al. 1990; Gobron et al. 1997a), représentent le paysage par un simple profil vertical d'éléments absorbants ou diffusants (feuilles). Par contre, les modèles dits hétérogènes représentent le paysage par une distribution spatiale non uniforme d'éléments du paysage (Li et al., 1992-1995; Chen et Leblanc, 1997; Leblanc et al., 1999; North, 1996; Govaerts et Verstraete, 1998; Thompson et Goel 1998; Helbert et al., 2004). Le modèle DART simule la propagation du rayonnement dans des milieux quelconques, homogènes ou hétérogènes. Son équation générale (Hapke, 1993) donne le taux de variation au lieu r par unité de déplacement dr selon la direction Ω d'une onde monochromatique stationnaire, d'intensité $I(r,\Omega)$ (Watts par unité d'angle solide : $W.sr^{-1}$) :

$$\frac{dI(r,\Omega)}{dr}=[\xi.\frac{d}{dx}+\eta.\frac{d}{dy}+\mu.\frac{d}{dz}]I(r,\Omega)=-\alpha(r,\Omega).I(r,\Omega)+\int_{4\pi}\alpha(r,\Omega').\omega(r,\Omega').\frac{P(r,\Omega'\rightarrow\Omega)}{4\pi}.I(r,\Omega').d\Omega'+\alpha_B(r,\Omega).L_B(r,T) \qquad \text{(I-5)}$$

ξ, η et μ sont les cosinus directeurs de la direction de propagation (Ω) de l'onde selon les axes x, y et z.

$\alpha(r,\Omega)$ [m^{-1}] est le coefficient d'extinction total calculé comme la somme du coefficient d'absorption $\alpha_a(r,\Omega)$ et du coefficient de diffusion différentiel $\alpha_d(r,\Omega'\rightarrow\Omega)$ pour la diffusion de photons incidents selon la direction (Ω') et diffusés dans l'angle solide unité centré sur (Ω). L'albédo de diffusion $\omega(r,\Omega)$

est le rapport $\frac{\alpha_d(r,\Omega\rightarrow 4\pi)}{\alpha(r,\Omega)}$. Le terme $\frac{P(r,\Omega'\rightarrow\Omega)}{4\pi}$ est la fonction de phase normalisée : fraction du flux intercepté selon (Ω') et diffusé par unité d'angle solide selon la direction (Ω). Les 3 termes de droite de l'équation (I-5) donnent la variation de $I(r,\Omega)$ par unité de déplacement $dr(\Omega)$. Les 2 premiers termes englobent les processus d'interception sur tout le domaine optique. Le premier terme représente l'atténuation de l'onde, associée aux phénomènes d'absorption et de diffusion "$\Omega \rightarrow 4\pi$", lors de sa propagation dans le milieu selon la direction (Ω). Le second terme caractérise la diffusion de l'onde selon (Ω) due à la diffusion des ondes au point r, en provenance de toutes les directions de l'espace. Le 3ème terme décrit seulement l'émission thermique, phénomène associé essentiellement aux grandes longueurs d'onde (*i.e.* $\lambda >$ 3µm). $I_B(r,T)$ est l'intensité de l'onde émise au point r par m^2 efficace de corps noir de température T (I_B=L_B.1m^2). L'efficacité d'émission thermique d'un corps (*i.e.* émissivité) est $\varepsilon_B(r,\Omega) = 1 - \omega(r,\Omega) = \frac{\alpha_B(r,\Omega)}{\alpha(r,\Omega)}$) où $\alpha_B(r,\Omega)$ est le coefficient d'émission

- ***Modélisation DART***

La résolution de (I-5) repose sur la méthode des ordonnées discrètes (Kimes et Kirchner, 1982) : discrétisation de la variable angulaire Ω en N_{dir} cônes angulaires contigus. Cette méthode transforme l'équation intégro-différentielle en N_{dir} équations différentielles où tout cône possède une direction centrale Ω_n et une largeur angulaire $\Delta\Omega_n$. La direction solaire (ici notée Ω_o ou Ω_s) est traitée à part. Elle ne peut qu'être incidente (monodirectionnelle) et sa largeur angulaire est non définie. Le nombre total de directions discrètes est donc $N_{dir}+1$. En notant $W(r,\Omega_n)=I(r,\Omega_n).\Delta\Omega_n$ la puissance (W) localement transportée en r selon la direction (Ω_n) dans un cône ($\Delta\Omega_n$), l'équation tridimensionnelle du transfert radiatif s'écrit $\forall n \in [1\ \ N_{dir}]$:

$$[\mu_n.\frac{d}{dz}+\eta_n.\frac{d}{dy}+\xi_n.\frac{d}{dx}]\ W(r,\Omega_n) = -\alpha(r,\Omega_n).W(r,\Omega_n) + \sum_{m=0}^{N_{dir}} \alpha(r,\Omega_m).\omega(r,\Omega_m).\frac{P(r,\Omega_m\rightarrow\Omega_n)}{4\pi}.W(r,\Omega_m).\Delta\Omega_n + \alpha_B.W_B(r,\Omega_n) \qquad \text{(I-6)}$$

Le terme $W(r,\Omega_n)$ peut être assimilé à un flux de photons issu d'un cylindre de section infinitésimale ΔS ($\Delta S<\Delta x.\Delta y$, $\Delta x.\Delta z$, $\Delta y.\Delta z$) et d'axe parallèle à la direction Ω_n. En notant $L_{\Delta S}(r,\Omega_n)$, la luminance de la surface ΔS normale à la direction de propagation Ω_n, nous avons :

$$W(r,\Omega_n) = L_{\Delta S}(r,\Omega_n).\Omega_n.\Delta S \qquad \text{(I-7)}$$

En fait, le flux simulé est [$W(r,\Omega_n)$, $W_{nf}(r,\Omega_n)$, $W_p(r,\Omega_n)$], où :

- $W_{nf}(r,\Omega_n)=nf(\Omega).W(r,\Omega_n)$ est le flux non foliaire (*i.e.*, aucune diffusion volumique foliaire). Le flux total est $W(r,\Omega_n) = W_{nf}(r,\Omega_n) + W_{df}(r,\Omega_n)$, où $W_{df}(r,\Omega_n)$ est le flux "diffus foliaire" (*i.e.*, au moins une diffusion volumique foliaire). La connaissance de $W_{df}(r,\Omega_n) = df(\Omega).W(r,\Omega_n)$ est utile pour évaluer le contenu "biochimique" des mesures spectrométriques de la végétation. On a : $nf(\Omega) + df(\Omega) = 1$.
- $W_p(r,\Omega_n)=p(\Omega).W(r,\Omega_n)$ est le flux polarisé d'ordre 1. Il n'est créé que par la diffusion du rayonnement solaire direct et/ou par l'émission thermique.

Afin d'obtenir une discrétisation précise de (I-6), les N_{dir} angles solides $\Delta\Omega_n$ doivent être petits, surtout pour un milieu hétérogène et/ou caractérisé par une fonction de phase anisotrope.

Les flux incident et diffusé ne peuvent suivre que ces N_{dir}+1 directions discrètes. Ces directions ne sont pas forcément espacées régulièrement. Elles peuvent être choisies *a priori* par l'opérateur. Les fonctions de transfert sont calculées pour ces directions. Elles ne sont donc pas des valeurs moyennes associées aux cônes angulaires. Cette approximation est justifiée par la faible valeur des angles solides.

Un intérêt majeur de la discrétisation régulière du paysage est d'accélérer le suivi de rayons. En effet, le trajet d'un rayon issu de la cellule (i, j, k) est à la translation (i, j, k) près le trajet pré-calculé depuis la cellule **O** (0, 0, 0) selon la même direction. Tous les trajets possibles des rayons sont donc pré-calculés pour éviter les calculs répétitifs lors du suivi de rayons dans la maquette. Tout trajet pré-calculé est en général constitué de 2 listes chaînées (Figure I.11) en série, afin de réduire l'espace mémoire requis :

- *1ère liste chaînée :* un des $(N_{sc}^3 + 6.N_{sf}^2 + 7).N_{dir}$ trajets pré-calculés issus des N_{sc}^3 sous centres de la cellule **O**, $6N_{sf}^2$ sous centres des faces de la cellule **O**, 6 centres des faces ou centre de **O** jusqu'aux plans horizontaux inférieur et supérieur qui bornent **O**. Valeurs prédéfinies : N_{sc}=5 et N_{sf}=10.
- *2ème liste chaînée :* un des $N_{sf}^2.N_{dir}$ trajets pré-calculés issus du centre des $2.N_{sf}^2$ sous faces des faces supérieure et inférieure de **O**. Le volume mémoire de stockage est réduit en limitant à Max {200, Nb_cell_Oz, $\sqrt{(Nb_cell_Ox)^2+(Nb_cell_Oy)^2}$} la longueur des $N_{sf}^2.N_{dir}$ listes chaînées.

Toute liste chaînée associée à un rayon de direction (Ω) stocke pour toute cellule (i,j,k) traversée :

- les indices (i, j, k),
- la longueur de traversée Δl_i, et
- les coordonnées absolues du point d'entrée du rayon.

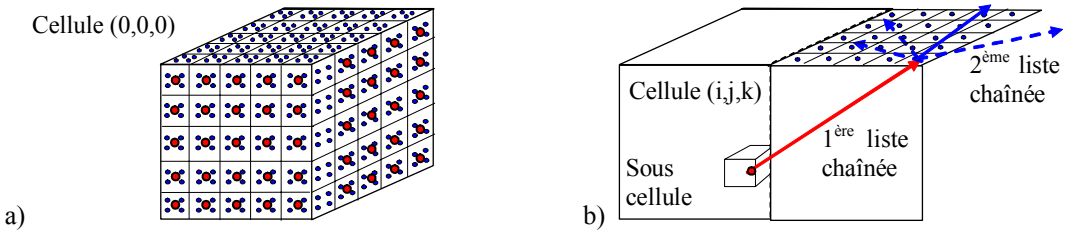


*Figure I.11: (a) N_{sc}^3 sous-centres et $6.N_{sf}^2$ sous-faces de la cellule **O** (0,0,0). (b) Rayon issu du centre d'une sous-cellule de coordonnées (i, j, k).*

- ***Illumination de la scène***

L'éclairement au bas de l'atmosphère (*i.e.* BOA : Bottom Of the Atmosphere) comprend 2 composantes: le rayonnement solaire direct $W_{sBOA,q}(\Omega_s)$ et/ou atmosphérique diffus $W_{aBOA,q}(\Omega_n)$. Les origines des flux associés sont les cellules de la couche horizontale, appelée couche fictive, juste au dessus du paysage terrestre. Depuis chaque cellule, n^2 vecteurs source $W_{sBOA,q}(\Omega_s)$ simulent le rayonnement solaire direct selon $\Omega_s(\theta_s,\varphi_s)$, pour l'intervalle spectral q. Par défaut n=7. Avec la notation $\Delta x.\Delta y = \frac{\Delta x.\Delta y}{n^2}$, on a :

$$W_{sBOA,q}(\Omega_s) = E_{sBOA,q}(\Omega_s).|\mu_s|.\Delta x.\Delta y \quad \text{(I-8)}$$

Les vecteurs sources de l'éclairement atmosphérique sont :

$$W_{aBOA,q}(\Omega_n) = L_{aBOA,q}(\Omega_n).|\mu_n|.\Delta x.\Delta y.\Delta\Omega_n \quad \text{(I-9)}$$

où $\mu_s = \cos\theta_s$, $\mu_n = \cos\theta_n$, $E_{s,q}(z=H,\Omega_s)$ est la constante solaire et $L_{aBOA,q}(\Omega_n)$ la luminance spectrale atmosphérique selon la direction (Ω_n), avec n∈[1 N'], où N' est le nombre de directions descendantes.

L'éclairement de la face supérieure d'une cellule du haut de la basse atmosphère est :

$$E_{sBOA,q}(\Omega_s,\Omega_n) = \frac{1}{\Delta x.\Delta y}.[W_{sBOA,q}(\Omega_s) + \sum_{n=1}^{N'} W_{aBOA,q}(\Omega_n)] \quad \text{(I-10)}$$

$W_{aBOA,q}(\Omega_n)$ peut être "isotrope" (en spécifiant la fraction d'éclairement diffus : SKYL) ou "anisotrope" *e.g.*, éclairement $E_{aBOA,q}(\Omega_n)$. La simulation du transfert radiatif dans l'atmosphère (Dallest, 2001; Gascon, 2001) calcule l'éclairement $E_{aBOA,q}(\Omega_n)$. De plus, elle améliore (1) l'aspect opérationnel, car on évite de coupler DART avec un modèle atmosphérique, et (2) la précision du couplage radiatif "Terre - Atmosphère", compte tenu de l'hétérogénéité des surfaces terrestres.

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 flux transmis associé après un trajet Δl_i dans une cellule i est noté $W(\Delta l_i,\Omega_n)$.

Une simulation DART peut être effectuée simultanément pour Q longueurs d'onde (λ), avec $q \in [1\ Q]$.

Il existe 2 modes de fonctionnement du modèle DART :

- *mode (R):* simulation de réflectances. La seule source d'énergie est le soleil, avec ou sans (SKYL(λ) ou $L_{BOA,q}(\Omega)$) T-R atmosphérique. Valable pour tout λ, mais plutôt adapté à λ <2.5µm.
- *mode (T):* simulation de températures de brillance spectrales. Les sources d'énergie sont {paysage terrestre + atmosphère} ou bien {paysage terrestre + atmosphère + soleil} (adapté au domaine spectral [3µm - 5µm]), avec ou sans (SKYL(λ) ou $E_{BOA,q}(\Omega)$) T-R atmosphérique.

● ***Approche itérative***

Les rayons sont suivis avec une approche itérative. Tout d'abord (*i.e.* itération $k = 0$), tous les rayons $W_0(r,\Omega_n)$ issus des sources présentes sont simulés. Durant leur propagation, ces rayons rencontrent des cellules élémentaires. Divers mécanismes d'interaction surviennent selon les propriétés optiques et structurales des éléments contenus dans ces cellules. Les rayons traversent les cellules vides, mais sont totalement interceptés par toute figure de cellule opaque (*e.g.* cellules "sol", "eau", "route"), et en partie interceptés et transmis par les cellules semi-opaques (*e.g.* cellules "végétation", "urbain", "tronc") ou mixtes. La puissance des rayons varie durant leur propagation : diminution par interception (absorption/diffusion) et augmentation par émission thermique. A l'itération $k = 1$, la diffusion de rayonnement intercepté engendre de nouveaux rayons $W_1(r,\Omega_n)$ selon les N_{dir} directions de l'espace. Le long de leurs trajets, ces rayons engendrent de nouveaux mécanismes de diffusion $W_k(r,\Omega_n)$ ($k \in [2\ \infty[$). A chaque itération, les rayons incidents sur les cellules de la couche fictive et/ou les cellules à l'altitude

du capteur et/ou en haut de l'atmosphère, sont stockés. Ce processus prend fin quand tous les rayons sont sortis par le haut de la maquette ou jusqu'à ce que leur intensité devienne inférieure à un seuil.

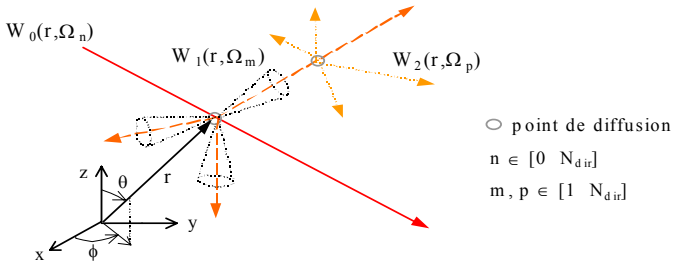


Figure I.12:

Schéma du mécanisme de diffusion (d'après Gascon, 2001).

Deux seuils sont utilisés pour éliminer tout rayon dont l'énergie $W(r,\Omega_n)$ devient très faible :

- Arrêt durant l'illumination solaire directe $W_0(r,\Omega_s)$: arrêt si $W_0(r,\Omega_s) < T_1.W_0(top,\Omega_s)$, où $W_0(top,\Omega_s) = E_s(top).\cos\theta_s.\Delta u.\Delta v$ est l'énergie solaire incidente sur une surface $\Delta u.\Delta v$ (tout ou partie de face horizontale de cellule du haut de la maquette). $T_1 = 10^{-4}$ est fixé dans le code.
- Arrêt de rayons $W_k(r,\Omega_s)$ après l'illumination directe solaire : arrêt si $W_k(r,\Omega_s) < T_2.<\Sigma W>_{1,2}.\Delta\Omega_n/4\pi$ s'il a déjà été diffusé (modes R et T), si c'est un rayon thermique non encore diffusé (mode T), ou si c'est un rayon atmosphérique (modes R et T).$<\Sigma W>_{1,2}$ = Max {moyenne des vecteurs source diffusés par le sol aux itérations 1 et 2)}. Le terme T_2 (*e.g.* 10^{-4}) est spécifié par l'opérateur.

De plus, une simulation DART (mode R et T) est arrêtée si la variation de l'exitance entre 2 itérations successives est inférieure à l'exitance totale fois un seuil T_3 fixé dans le batch de DART (*e.g.*, 10^{-4}) :

$$\frac{\int_{2\pi^+} L_{k+1}(\Omega_n).\cos\theta.d\Omega_n - \int_{2\pi^+} L_k(\Omega_n).\cos\theta.d\Omega_n}{\Sigma_k \left[\int_{2\pi^+} L_k(\Omega_n).\cos\theta.d\Omega_n\right]} = \frac{\Sigma_n W_{k+1}(\Omega_n) - \Sigma_n W_k(\Omega_n)}{\Sigma_k [\Sigma_n W_k(\Omega_n)]} < T_3$$

En mode R, ce rapport est la variation relative des albédos successifs du paysage terrestre :

$$\frac{\Sigma_n \rho_{k+1}(\Omega_n).\cos\theta_n.\Delta\Omega_n - \Sigma_n \rho_k(\Omega_n).\cos\theta_n.\Delta\Omega_n}{\Sigma_k [\Sigma_n \rho_k(\Omega_n).\cos\theta_n.\Delta\Omega_n]} = \frac{\omega_{k+1} - \omega_k}{\Sigma_k \omega_k}$$

- ***Facteur de réflectance bidirectionnelle*** (FRD : Nicodemus *et al.*, 1997 ; Martonchik *et al.*, 2000)

Quel que soit le mode (R) ou (T), la luminance directionnelle associée au vecteur source $W_{out,q}(i,j,\Omega_v)$ dans l'intervalle spectral Δq qui sort de la scène par la cellule de coordonnées horizontales (i,j), de surface $\Delta X.\Delta Y$, selon la direction $\Omega_v(\theta_v,\phi_v)$ est : $L_{out,q}(i,j,\Omega_v) = \frac{1}{\Delta X.\Delta Y}.\frac{W_{out,q}(i,j,\Omega_v)}{\mu_v.\Delta\Omega_v}$ [W.m^{-2}.sr^{-1}].

Dans le cas d'un éclairement incident $E_{in,q}(\Omega_s)$, le facteur de réflectance bi-directionnel spectral est :

$$R(\Omega_s,\Omega_v) = \frac{\pi.L_{out,q}(i,j,\Omega_v)}{E_{in,q}(\Omega_s)} \qquad \text{(I-11)}$$

- ***Température de brillance (T_B) directionnels***

En mode "T", T_B est calculée en appliquant la loi de Planck inverse sur $L_{out,q}(i,j,\Omega_v)$:

$$T_B(\Omega_s,\Omega_v) = \frac{h.c}{k.\lambda_o}.\{\ln[1 + \frac{2.h.c.\Delta q}{\lambda_o^5.L_{out,q}(i,j,\Omega_v)}]\}^{-1} \qquad \text{(I-12)}$$

où c est la vitesse de la lumière, h et K les constantes de Planck et Boltzmann. La longueur d'onde équivalente λ_o est la longueur d'onde qui sur $\Delta\lambda = \lambda_{max} - \lambda_{min}$ satisfait la relation :

$$L_B(\lambda_o, T_m) = \frac{1}{\Delta\lambda} \cdot \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} L_{out}(\lambda, T_m).d\lambda \qquad (\lambda_{min} = \lambda_{max}, \Rightarrow \lambda_o = \lambda_{min} = \lambda_{max}) \qquad \text{(I-13)}$$

où T_m (K) = température moyenne du paysage terrestre (Dallhuin, 2002). En général : $\lambda_o \neq \frac{\lambda_{min} + \lambda_{max}}{2}$.

Deux approches peuvent être utilisées pour assigner les températures des éléments de la scène :

- un fichier 3-D de température est disponible,
- une phase d'illumination dans les courtes longueurs d'ondes détermine le rayonnement absorbé par tout élément, ce qui permet de lui affecter une température, sachant que la température de tout milieu turbide et surface opaque (*Sol*, *Eau*, *Route, Plot_Opaque*, *Mur, Toit, etc*) est comprise dans un intervalle pré-défini (c*f. I.5.1* fichier *coeff_diff.src*) spécifique. Seuls, les murs bordant la maquette ont une température définie.

Les images de sortie de DART sont formées par les FRD et T_B à une altitude donnée. Leur résolution spatiale dépend donc des dimensions horizontales des cellules.

I.2.3 Base de données atmosphériques

L'atmosphère est supposée avoir une homogénéité horizontale, car ses constituants majeurs (gaz : N_2, O_2, CO_2, O_3, *etc.* et aérosols) sont concentrés dans les premiers kilomètres au-dessus de la Terre et les zones simulées avec DART sont petites devant le rayon terrestre. Les cellules *Air* de même altitude, au-dessus du paysage terrestre, ont donc des propriétés optiques identiques. Ces propriétés sont définies par six paramètres (Handbook, 2006 ; Gascon, 2001) :

- *4 paramètres variables avec l'altitude (z) :*
  - $\alpha_m^a(z)$: Coefficient d'extinction par absorption des gaz (m^{-1}).
  - $\alpha_m^d(z)$: Coefficient d'extinction par diffusion des gaz (m^{-1}).
  - $\alpha_p^a(z)$: Coefficient d'extinction par absorption des aérosols (m^{-1}).
  - $\alpha_p^d(z)$: Coefficient d'extinction par diffusion des aérosols (m^{-1}).

  La distribution verticale (par cellule) des coefficients d'extinction est calculée à partir des facteurs d'échelle H et des épaisseurs optiques totales (z=0km à ∞) des gaz τ_e^m et des aérosolsτ_e^p. Ainsi, le coefficient d'extinction par absorption d'une cellule ($z \in [z_1\ z_2]$) est :

$$\alpha_a^m(z_1,z_2) = \Sigma_m \left\{\frac{\tau_a^m}{(z_2-z_1)}.[\exp(\frac{z_2}{H_m}) - \exp(\frac{z_1}{H_m})]\right\} + \Sigma_p \left\{\frac{(1-\omega_p).\tau_a^p}{(z_2-z_1)}.[\exp(\frac{z_2}{H_p}) - \exp(\frac{z_1}{H_p})]\right\} + \alpha_a^{O3}(z) \qquad \text{(I-14)}$$

- *2 paramètres indépendants de l'altitude :*
  - Fonction de phase (fonction Rayleigh) des gaz (sr^1): $P_m(\Psi_{i,v}) \approx 0.7552 + 0.7345.\cos^2(\Psi_{i,v})$.

- $\frac{P_p(\Psi_{i,v})}{4\pi}$: Fonction de phase des aérosols (sr^{-1}). Etant très anisotrope (avant et arrière), cette fonction est approchée par la somme pondérée de 2 fonctions de Henyey-Greenstein :

$$P_p(\Psi_{i,v}) = \frac{a_p.(1-g_{1p}^2)}{\left[1+g_{1p}^2-2g_{1p}.\cos(\Psi_{i,v})\right]^{1.5}} + \frac{(1-a_p).(1-g_{2p}^2)}{\left[1+g_{2p}^2-2g_2.\cos[180-\Psi_{i,v}]\right]^{1.5}} \quad \text{(I-15)}$$

où $\Psi_{i,v}$ est l'angle de phase entre Ω_i et Ω_v. Le paramètre a_p et les facteurs d'asymétrie g_{1p} et g_{2p} dépendent de la taille des aérosols et de λ.

Une cellule *Air* traversée par un rayon $W_i(\Omega_i)$ sur un trajet Δl intercepte :

$$W_{int}(\Omega_i) = W_i(\Omega_i).\left[1 - \exp(-(\alpha_m^a + \alpha_m^d + \alpha_p^a + \alpha_p^d).\Delta l)\right] \quad \text{(I-16)}$$

Par suite, la diffusion volumique (ordre 1) de la cellule selon (Ω_v, $\Delta\Omega_v$) est :

$$W_{diff}(\Omega_v) = W_{int}(\Omega_i).\left[T_m(\psi_{i,v}).\frac{\alpha_m^e}{\alpha_p^e+\alpha_m^e}.\omega_m + T_p(\psi_{i,v}).\frac{\alpha_p^e}{\alpha_p^e+\alpha_m^e}.\omega_p\right] \quad \text{(I-17)}$$

où $\omega_m = \frac{\alpha_m^d}{\alpha_m^a+\alpha_m^d}$ et $\omega_p = \frac{\alpha_p^d}{\alpha_p^a+\alpha_p^d}$ sont les albédos de diffusion des molécules et des aérosols

et $T_m(\psi_{i,v}) = \int_{\Delta\Omega_v} \frac{P(\psi_{i,v})}{4\pi}.d\Omega_v \approx \frac{P(\psi_{i,v})}{4\pi}.\Delta\Omega_v$ est la fonction de transfert par diffusion de DART

La cellule intercepte en partie les $W_{diff}(\Omega_v)$, ce qui induit des diffusions multiples intra-cellule. Hors de celle-ci, l'énergie diffusée se propage selon une droite qui passe par le centre de la cellule.

Les paramètres atmosphériques indiqués ci-dessus peuvent être entrés de 2 manières :

- *Opérateur* (mode R mono-spectral) : éclairement solaire E_λ ($W.m^{-2}.\mu m^{-1}$), facteur d'échelle des gaz H_m (m), épaisseur optique de diffusion des gaz τ_m^d, transmittance des gaz d'absorption T_m^a, facteur d'échelle des aérosols H_p (m), épaisseur optique des aérosols τ_p, albédo des aérosols ω_p, coefficients g_{1p} , g_{2p} et a_p des 2 fonctions de Henyey-Greenstein et altitude du capteur (H_{Capt}).

- *Base de données atmosphériques* (BDA) : valeurs spectrales de 0.3μm à 15μm avec un pas de 1 ou de 10 cm^{-1} dérivées de mesures ou d'un modèle atmosphérique comme MODTRAN (Berk *et al.*, 1989). Elle est stockée respectivement dans les fichiers texte *database1.txt* et *database10.txt*.
  - 7 modèles gazeux : 1 éditable et 6 classiques {"*US Standard 1976*", "*Tropical*" (15° nord), "*Mid-Latitude Summer*" (45° nord - juillet), "*Mid-Latitude Winter*" (45° nord - janvier), "*Sub-Arctic Summer*" (60° nord - juillet), "*Sub-Arctic Winter*" (60° nord - janvier)}.
  - 7 modèles d'aérosols : 1 éditable et 6 classiques {"*Rural V=23km et V=5km*" (poussières principalement), "*Maritime V=23km*" (aérosols maritimes), "*Urban V=5km*" (pollution urbaine), "*Tropospheric V=50km*" (très faible quantité), "*Fog Radiation V=0.5km*" (composants hydriques). Le terme *V* indique la visibilité horizontale.

  La base de données atmosphériques contient les paramètres atmosphériques suivants (Tableau I.3) :

  - Constante solaire spectrale TOA $E_{\lambda 0}$ ($W.m^{-2}.\mu m^{-1}$) à la distance Terre-Soleil moyenne (149.10^6km), de 0.3µm à 15µm. Par suite, la constante E_λ pour le jour Julien J ([1 365]) est :

    $E_\lambda = E_{\lambda 0}.[1 + e.\cos(\frac{2\pi(J-3)}{365})]^{-2}$ où (e) est l'excentricité de l'orbite terrestre (e≈0.0167)

- Profils verticaux des températures pour les 6 modèles gazeux classiques (US Standard, Tropical, Mid Latitude Summer, Mid Latitude Winter, Sub Arctic Summer et Sub Arctic Winter).
- Paramètres α et β de la loi d'Angstrom : des gaz non absorbants : l'épaisseur optique spectrale de l'ensemble des gaz, pour la diffusion, est supposée suivre la loi $\tau(\lambda) = \alpha.\lambda^{-\beta}$ (Lenoble, 1993).
- Facteurs d'échelle des gaz H_m : ils ont été calculés par régression sur les profils de densité volumique des gaz absorbants (H_2O, CO_2, CO, CH_4, N_2O) et diffusants (O_2, N_2) majeurs, pour les 7 modèles gazeux. Les coefficients d'extinction associés sont : $\alpha(z) = \frac{\tau}{H}.\exp[-\frac{\tau}{H}]$ où $\tau = \tau_m^a$ ou τ_m^d.
- Profil de fraction de O_3 (de 0 à 50km, $\Delta z = 1$km) : pour les 7 modèles gazeux.
- Transmittance spectrale (0.3 à 15µm) des gaz absorbants (T_m^a) pour les 7 modèles gazeux.
- Transmittance spectrale (0.3 à 15µm) T_{H20} (d_{H20}) de H_2O pour 20 épaisseurs d'eau précipitable d_{H20} (0.1 à 5 cm) distribuées selon l'atmosphère "*US Standard 1976*". Le mode "Configurable" permet de spécifier l'épaisseur d_{H20} pour les 7 modèles. DART interpole T_{H20} pour ce d_{H20}. Pour plus de précision, les T_{H20} peuvent être celles associées au modèle gazeux considéré. L'eau est traitée de manière particulière du fait de sa forte variabilité dans l'espace et le temps.
- Facteurs d'échelle des aérosols (H_p) : pour les 7 modèles d'aérosols.
- Albédo (ω_p) et épaisseur optique (0.3 à 15µm) des aérosols (τ_p) pour les 7 modèles d'aérosols.
- Paramètres g_{1p}, g_{2p} et a_p de la fonction de phase des aérosols pour les 7 modèles d'aérosols.

Option	Constituant	Paramètres	Description
L'utilisateur spécifie : T et H_m		E_λ	Constante solaire
	GAZ	H_m	Facteur d'échelle moyen pour les gaz
		τ_m^d	Épaisseur optique pour la diffusion des gaz
		T_m^a	Transmittance due à l'absorption gazeuse
	AEROSOLS	τ_p, H_p	Épaisseur optique et facteur d'échelle (aérosols)
		ω_p, g_{1p}, g_{2p}, a_p	Albédo et paramètres de la fonction de phase (aérosols)
Configuration pré-définie (base de données)		λ_{min} , λ_{max}	Longueur d'onde minimale et maximale (μm)
		J	Jour Julien
	GAZ	n° type (d_{H2O} si n° type=7)	Manual (0), US Standard (1), Tropical (2), Mid Latitude Summer (3) / Winter (4), Sub-artic Summer (5) / Winter (6), User define (7)
	AEROSOLS	n° type	Editable (0), Rural V=23km (1), Rural V=5km (2), Maritime V=23km (3), Urban V=5km (4), Tropospheric V=50 km (5), Fog Radiation V=0.5km (6)

Tableau I.3 : Paramètres atmosphériques utilisés par DART

I.2.4 Modélisation des images dans le plan du capteur

● ***Projection des images et étalement de l'énergie***

La discrétisation combinée du paysage et de l'éclairement (*i.e.* n^2 vecteurs source par cellule de la couche fictive ; par défaut n = 7) explique que des éléments plans (*e.g.* toit de maison) de propriétés optiques identiques sur toute leur surface apparaissent dans les images simulées avec des surfaces de

propriétés optiques non identiques, surtout pour les directions de visée obliques. Ce défaut est réduit en sur-échantillonnant la grille (plan horizontal) qui stocke les images et en étalant l'énergie stockée dans cette grille. La projection des images dans le plan du capteur comprend 3 étapes (Gentine, 2002) :

1.) Projection de chaque rayon issu de toute cellule dans une maille horizontale sur-échantillonnée (par défaut, le sur-échantillonnage vaut 2) en haut de BA. Cette approche rayon par rayon a pour but de dégrader le moins possible à la fois la résolution spatiale des images et la localisation des éléments de la scène. Ainsi, il est tenu compte des éléments plus petits que les cellules et de la présence d'éléments entre la maille horizontale et les cellules à l'origine des rayons. La projection distingue 3 catégories (non disjointes) de cellules selon leur contenu :

- *Cellules turbides* : Milieu uniquement ("*T*", "*N_T*": *Plot*, *Houppier*, *Twig*, *Air*) ou en partie (*Opaque_nT*) turbide. La section horizontale $\Delta X*\Delta Y$ à mi-hauteur (*Figure I.13*) de la cellule est projetée sur la maille. Dans celle-ci, l'énergie du rayon est répartie uniformément dans le ou les pixels qui contiennent le projeté de la section. Cette approche ne peut créer d'intersection entre les étalements de 2 rayons issus de 2 cellules turbides adjacentes de même hauteur.

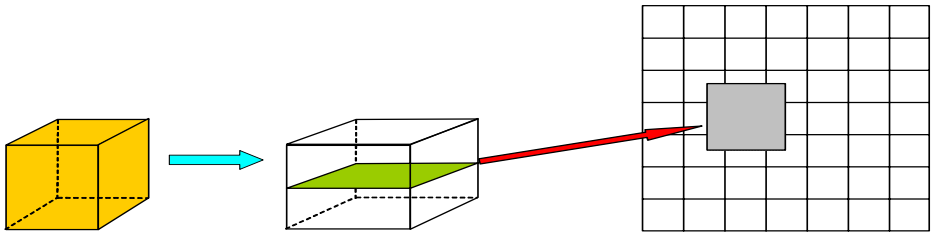


Figure I.13 : Projection sur la maille horizontale de la surface caractéristique de toute cellule ($\Delta X*\Delta Y$ à mi-hauteur) turbide (Houppier,...) et mixte (e.g., milieu turbide de Opaque_nT).

- *Cellules "Opaque_plat"* : Milieu plan opaque (*e.g. Sol*, *Plot_Opaque*, *etc.*). La face supérieure $\Delta X*\Delta Y$ de la cellule est projetée sur la couche fictive, en tenant compte de sa hauteur ; *i.e.*, hauteur CoteMaxZ de la maquette (*i.e.*, 1 couche au-dessus de la plus haute cellule non vide). Ainsi, dans le repère lié aux arêtes de la scène, le projeté du point A(x, y, z) (en m) est :

$$A' = (x+\tan(\theta).\cos(\varphi)(CoteMaxZ - z),\ y+\tan(\theta).\sin(\varphi)(CoteMaxZ - z),\ CoteMaxZ - z) \qquad \text{(I-18)}$$

- *Cellules contenant des figures* : Milieu avec uniquement ("Opaque_MNT" + "Urbain" (Mur, *etc.*) ou en partie (*Opaque_nT*) des figures (triangles et parallélogrammes). Ces dernières pouvant être plus grandes que les cellules de la maquette, il est tout d'abord calculé la figure intersection entre la figure de départ et la cellule considérée (*Figure I.14*a), puis les sommets de ces figures sont projetés sur la maille horizontale, avec (I-18).

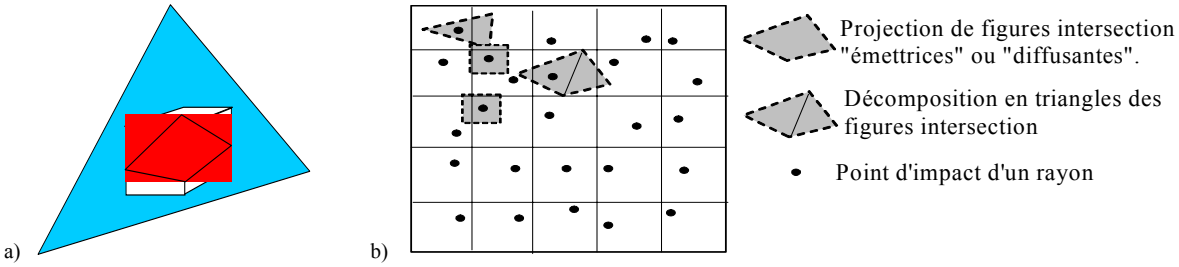


Figure I.14: a) Intersection (rouge) d'un triangle (bleu) avec une cellule. b) Projection de figures dans la maille horizontale (couche fictive) en haut de BA

2.) "Etalement uniforme" de l'énergie de tout rayon incident sur les pixels de la maille horizontale, compte tenu de l'intersection des pixels de cette maille et des triangles projetés, en 2 étapes :

- Délimitation de la zone possible d'intersection (*Figure I.15*a), suivi par la détermination dans cette zone des coins des pixels inclus dans le triangle projeté (Σ angles ≈ 360°).
- Calcul de l'intersection des côtés des pixels avec les triangles projetés. Les points d'intersection de chaque pixel sont regroupés en tant que sommets de triangles juxtaposés, ce qui permet de calculer l'aire interceptée par chaque pixel (Boyat, 2001). Si tout ou partie de la projection d'un élément est hors de la maille "DX x DY" (*Figure I.15*b), la projection est recopiée avec un décalage qui est un multiple de la période spatiale de la maquette.

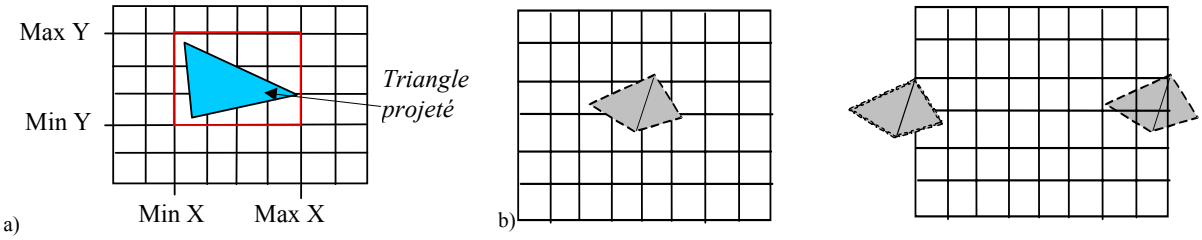
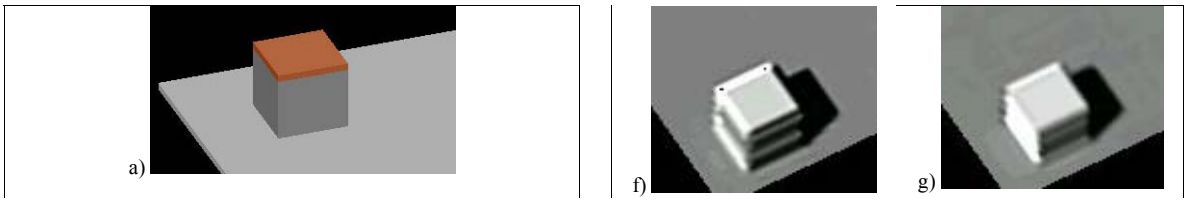


Figure I.15 : a) Bornes d'un triangle projeté sur la couche fictive. b) Projection dans et hors de la maille.

3) Projection dans le plan du capteur des images stockées dans la grille d'échantillonnage horizontale. Une interpolation bi-cubique (Gentine, 2002) donne l'intensité de tout point (X,Y) de l'image "capteur" à partir de la valeur de l'intensité de l'intensité, des 2 dérivées premières et de la dérivée croisée au point (E(P), E(Q)) correspondant dans l'image "horizontale", où E représente la valeur entière. La résolution spatiale du capteur est réglable. Par défaut, il est utilisé un sur-échantillonnage égal à 2. L'étalement de l'énergie améliore systématiquement la qualité des images. Ceci est illustré ici avec la simulation DART d'un immeuble parallélépipédique (*Figure I.16*).

Les images projetées dans le plan du capteur sont des images "horizontales" en haut de BA ou à toute altitude (capteur, HA) dans l'atmosphère. Ces images (capteur, TOA) sont obtenues par la convolution "Images simulées dans la maille en haut de BA - Fonctions de transfert $FT_{BA\text{-}capteur}$ et $FT_{BA\text{-}TOA}$.



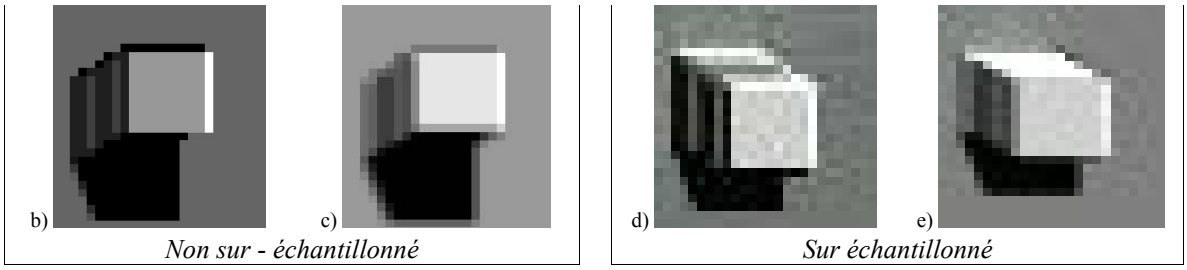


Figure I.16: Images de l'immeuble (a) BOA (b,c,d,e) et dans le plan du capteur (f et g), sans (b,d,f) et avec (c, e, g) étalement. Visée et éclairement (θ_s = 140°, φ_s = 20°) obliques. L'étalement atténue les contrastes fictifs sur les bords de l'immeuble.

- ***Géoréférencement***

Les images DART (horizontales et dans le plan du capteur) sont géoréférencées (*Figure I.17*), pour toute direction de visée. Ainsi, elles peuvent être superposées aux cartes (MNT, occupation du sol) à l'origine de la maquette. Elles correspondent à la surface {A,B,C,D} (images horizontales) à toute altitude dans l'atmosphère ou à sa projection {A",B",C",D"} dans le plan du capteur (*Figure I.18*)

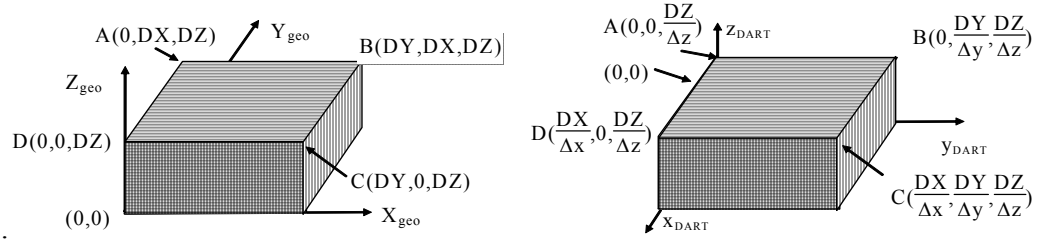
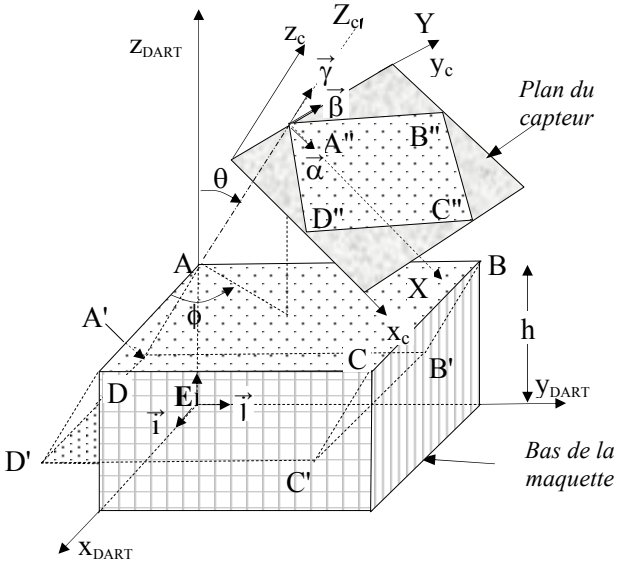


Figure I.17 : Repère géographique (gauche) et repère DART (droite). $x_{DART} = \frac{DX - Y_{geo}}{\Delta x}$ *et* $y_{DART} = \frac{X_{geo}}{\Delta y}$



h est la hauteur de la maquette terrestre.

$\vec{\gamma} = \Omega_v$, $\vec{\beta} \perp \{\vec{\gamma}, \vec{k}\}$, $\vec{\alpha} = \vec{\beta} \Lambda \vec{\gamma}$.

$$\text{Maquette} : \begin{pmatrix} \vec{i} \\ \vec{j} \\ \vec{k} \end{pmatrix} \quad \text{Capteur} : \begin{pmatrix} \vec{\alpha} \\ \vec{\beta} \\ \vec{\gamma} \end{pmatrix} = (A).\begin{pmatrix} \vec{i} \\ \vec{j} \\ \vec{k} \end{pmatrix}$$

$$(A) = \begin{pmatrix} \cos\theta.\cos\phi & \cos\theta.\sin\phi & -\sin\theta \\ -\sin\phi & \cos\phi & 0 \\ \sin\theta.\cos\phi & \sin\theta.\sin\phi & \cos\theta \end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow \begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{pmatrix} = (A).\begin{pmatrix} x_{DART} \\ y_{DART} \\ z_{DART} \end{pmatrix}$$

Figure I.18: Repères DART : maquette {i,j,k}, image horizontale {A,B,C,D}, image capteur $\{x_c, y_c, z_c\}$.

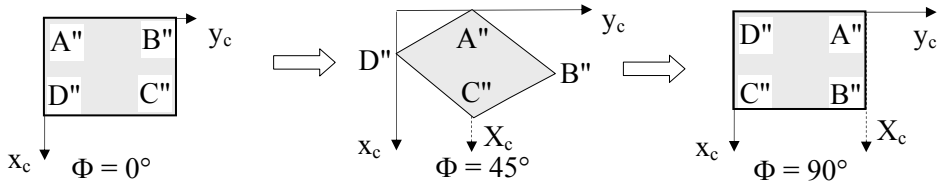
Le géoréférencement des images horizontales associe aux coordonnées image (colonne, ligne) des points {A,B,C,D} les coordonnées géographiques des projetés de ces points (*i.e.*, points {A',B',C',D'} du plan

$\{O,X_{geo},Y_{geo}\}$, selon la direction de visée $\{\theta_v,\Phi_v\}$. Cette opération correspond à la translation $\{-h.\tan\theta.\cos\Phi, -h.\tan\theta.\sin\Phi, h\}$:

$$\begin{aligned} &A'(-h.\tan\theta.\cos\Phi,\ -h.\tan\theta.\sin\Phi,\ 0) && B'(-h.\tan\theta.\cos\Phi,\ DY-h.\tan\theta.\sin\Phi,\ 0)\\ &C'(DX-h.\tan\theta.\cos\Phi,\ DY-h.\tan\theta.\sin\Phi,\ 0) && D'(DX-h.\tan\theta.\cos\Phi,\ -h.\tan\theta.\sin\Phi,\ 0) \end{aligned} \quad \text{(I-19)}$$

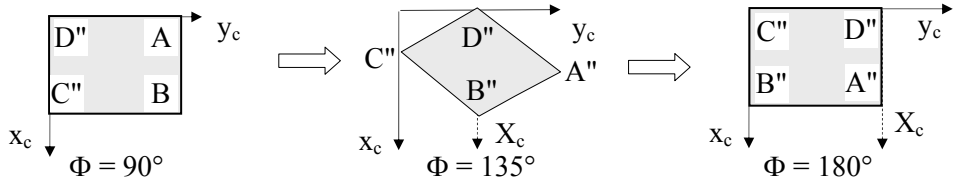
Le géoréférencement des images dans le plan du capteur associe aux coordonnées image (colonne, ligne) des points {A",B",C",D"}, projetés de {A,B,C,D} dans le plan du capteur, les coordonnées géographiques des projetés de {A,B,C,D} dans le plan $\{O,X_{geo},Y_{geo}\}$ selon la direction de visée $\{\theta_v,\Phi_v\}$. Ces coordonnées géographiques sont celles de {A',B',C',D'}. Leurs expressions analytiques en fonction des coordonnées image de {A",B",C",D"} diffèrent selon Φ_v. Ceci est cohérent avec le fait que le point origine (x_c=0,y_c=0) de l'image capteur est un point du plan {A,B,C,D} qui varie selon Φ_v. Il est important de noter que le repère $\{x_c,y_c,z_c\}$ est le repère $\{X_c,Y_c,Z_c\}$ (*i.e.* repère {A,B,C,D} projeté dans le plan du capteur) translaté pour que le point origine ait pour coordonnées (0,0).

a) $\Phi \in [0°\ \ 90°[$ $x_c(A") = y_c(D") = 0$ (A" en haut $\Leftrightarrow$ $X_c(A") = Y_c(A") = 0$)



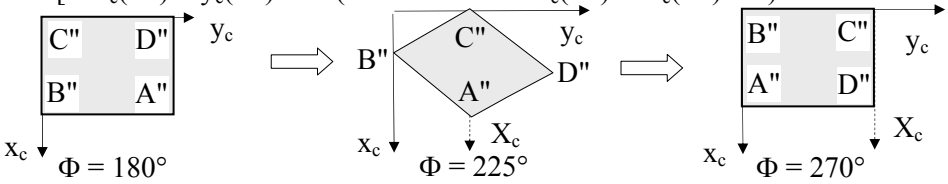
$$\begin{aligned} &A"(0,\ \eta.\sin\Phi.DX) && B"(\eta.\cos\theta.\sin\Phi.DY,\ \eta.\cos\Phi.DY+\eta.\sin\Phi.DX)\\ &C"(\eta.\cos\theta.(\cos\Phi.DX+\sin\Phi.DY),\ \eta.\cos\Phi.DY) && D"(\eta.\cos\theta.\cos\Phi.DX,\ 0) \end{aligned} \quad \text{(I-20)}$$

b) $\Phi \in [90°\ \ 180°[$ $x_c(D") = y_c(C") = 0$ (D" en haut $\Leftrightarrow$ $X_c(B") = Y_c(B") = 0$)



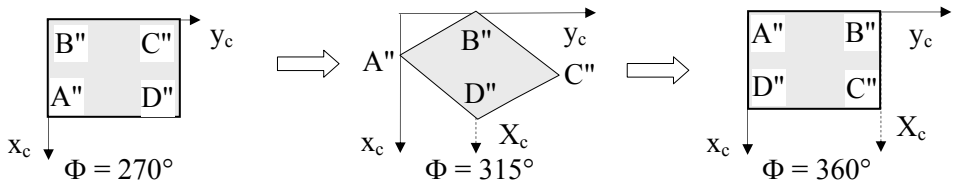
$$\begin{aligned} &A"(-\eta.\cos\theta.\cos\Phi.DX,\ \eta.\sin\Phi.DX-\eta.\cos\Phi.DY) && B"(-\eta.\cos\theta.\cos\Phi.DX+\eta.\cos\theta.\sin\Phi.DY,\ \eta.\sin\Phi.DX)\\ &C"(\eta.\cos\theta.\sin\Phi.DY,\ 0) && D"(0,\ -\eta.\cos\Phi.DX) \end{aligned} \quad \text{(I-21)}$$

c) $\Phi \in [180°\ \ 270°[$ $x_c(C") = y_c(B") = 0$ (C" en haut $\Leftrightarrow$ $X_c(C") = Y_c(C") = 0$)



$$\begin{aligned} &A"(-\eta.\cos\theta.\cos\Phi.DX-\eta.\cos\theta.\sin.DY,\ -\eta.\cos\Phi.DY) && B"(-\eta.\cos\theta.\cos\Phi.DX,\ 0)\\ &C"(0,\ -\eta.\sin\Phi.DX,\ 0) && D"(-\eta.\cos\theta.\sin\Phi.DY,\ -\eta.\sin\Phi.DX-\eta.\cos\Phi.DY) \end{aligned} \quad \text{(I-22)}$$

d) $\Phi \in [270°\ \ 360°]$ $x_c(B") = y_c(A") = 0$ (B" en haut $\Leftrightarrow$ $X_c(B") = Y_c(B") = 0$)



$A''(-\eta.\cos\theta.\sin\Phi.DY,\ 0)$ $\quad B''(0,\ \eta.\cos\Phi.DY)$

$C''(\eta.\cos\theta.\cos\Phi.DX,\ -\eta.\sin\Phi.DX+\eta.\cos\Phi.DY)$ $\quad D''(\eta.\cos\theta.\cos\Phi.DX-\eta.\cos\theta.\sin\Phi.DY,\ -\eta\sin\Phi.DX)$ (I-23)

● ***Réponse du capteur***

Quatre étapes permettent de transformer les images simulées dans le plan du capteur (octet, double ou float (Sun ou Intel)) en images effectivement acquises par le capteur (Handbook, 2006; Gascon, 2001) :

1. Convolution de l'image DART avec la réponse impulsionnelle (RI) du capteur (optique du télescope, détecteur et déplacement du capteur sur le paysage);
2 Conversion de la mesure effective du détecteur radiométrique en un nombre d'électrons à l'aide d'un facteur multiplicatif;
3. Ajout d'un bruit radiométrique additif comprenant 2 composantes dues à l'incohérence de la lumière et à la chaîne électronique de lecture et d'amplification;
4. Quantification de l'image sur 8 bits avec un étalement maximal de la dynamique. Elle correspond à l'ajout d'un bruit additionnel de quantification.

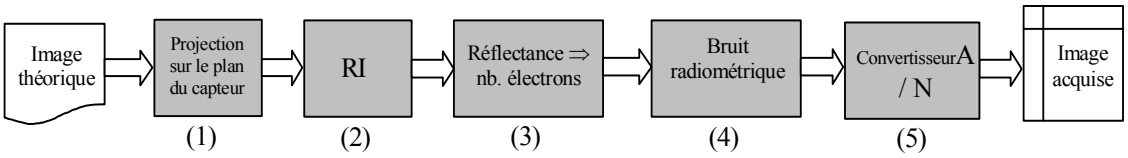


Figure I.19 : Schéma de la chaîne de simulation du système radiométrique.

I.3 DIFFUSION ET ÉMISSION DES MILIEUX OPAQUES

Les propriétés optiques des figures opaques sont caractérisées par la fonction de transfert diffuse $T_d(\Omega_s,\Omega_v)$ dérivée de mesures bi-directionnelles ou de modèles de sol (*e.g.*, Hapke, 1981) avec ou sans composante spéculaire $T_s(\Omega_s,\Omega_v)$ et composante de polarisation $T_p(\Omega_s,\Omega_v)$. Le module *Phase* (c*f.* I.5.1) pré-calcule $T_s(\Omega_s,\Omega_v)$ et $T_p(\Omega_s,\Omega_v)$ avec les paramètres entrés par l'opérateur (mode monospectral) ou lus dans une base de données (c*f.* I.5.1 ; Handbook, 2006) de réflectance spectrale (mode multispectral).

I.3.1 Mécanismes de diffusion

Soit un vecteur puissance $W_{in}(\Omega_s)$ incident sur une portion de plan opaque (*Figure I.20*) de normale (Ω_n) et de facteur de réflectance bi-directionnelle $\rho(\Omega_s,\Omega_v)$. La puissance diffusée par cette surface, selon un cône angulaire ($\Omega_v,\Delta\Omega_v$), est calculée à partir de l'énergie interceptée $W_{int}(\Omega_s)$:

$$W_{diff}(\Omega_v) = T_d(\Omega_s,\Omega_v).W_{int}(\Omega_s) \qquad \text{(I-24)}$$

où $T_d(\Omega_s,\Omega_v)$ est la fonction de transfert diffuse calculée à partir de l'angle de diffusion Ψ_{vn} :

$$T_d(\Omega_s,\Omega_v) = \frac{\rho(\Omega_s,\Omega_v)}{\pi}.\cos(\Psi_{vn}).\Delta\Omega_v \qquad \text{où } \cos(\Psi_{vn}) = |\Omega_v.\Omega_n| \qquad \text{(I-25)}$$

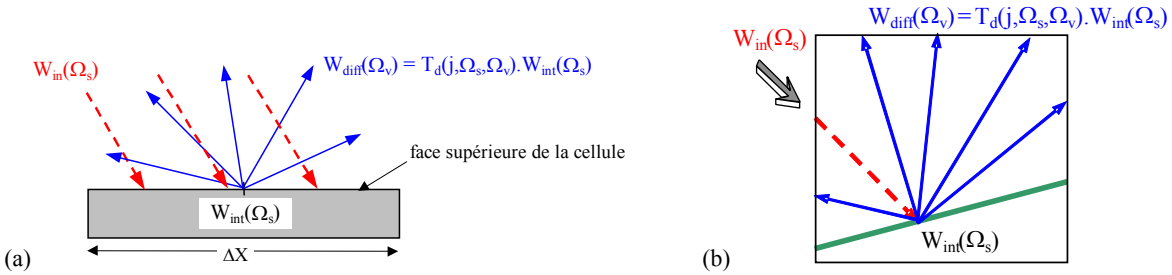


Figure I.20: Schéma des interactions au sein d'une cellule "opaque" : (a) cellules Sol, Eau, Route, Plot_Opaque. (b) cellules contenant des portions de plan.

Les 4 types possibles de diffuseur des cellules opaques sont :

- Lambertien (type 0),
- lambertien plus une composante spéculaire (type 1),
- le modèle analytique de Hapke (1981) étendu avec en plus une composante spéculaire (type 2),
- une fonction de phase prédéterminée (type 3).

1) *Diffuseur lambertien* : $\rho(\Omega_s,\Omega_v) = \rho_{lamb}$

$\rho(\Omega_s,\Omega_v)$ est constant et égal au facteur de réflectance direct-hémisphérique $\rho_{dh} = \rho_{lamb}$ (*i.e.*, albédo). Il peut être distribué aléatoirement selon la loi de moyenne ρ_{lamb} et d'écart type.

2) *Diffuseur "lambertien + spéculaire"* : $\rho(\Omega_s,\Omega_v) = \rho_{lamb}(\Omega_s,\Omega_v) + \rho_{spec}(\Omega_s,\Omega_v)$

La modélisation de la réflectance spéculaire $\rho_{spec}(\Omega_s,\Omega_v)$ est dérivée des équations de Fresnel. Elle est compliquée par la discrétisation des directions. En effet, la direction spéculaire Ω_v^* réelle doit être approchée par une ou plusieurs des directions discrètes disponibles Ω_v, sachant que Ω_v^* dépend de la direction du rayon incident et de l'orientation du diffuseur. L'angle entre Ω_v^* et Ω_v est noté Ψ_{vv^*}.

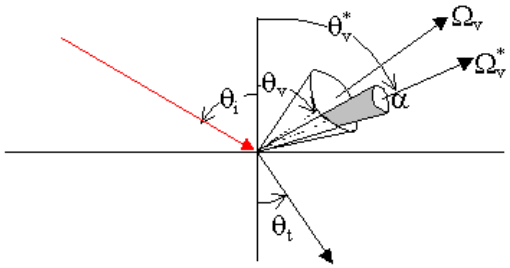


Figure I.21: Notations utilisées pour représenter la réflexion spéculaire de Fresnel

L'énergie spéculaire totale diffusée W_{spe} selon (Ω_v^*) est définie (*Figure I.21*) par la demi largeur angulaire $\alpha/2$, un facteur multiplicatif A et l'indice de réfraction $n(\lambda)$. Elle est supposée décroître quadratiquement comme $[\frac{\alpha^2}{4} - \Psi_{vv^*}^2]$ et être proportionnelle à la réflectance de Fresnel, à l'énergie incidente solaire interceptée $W_{int}(\Omega_s)$ et au facteur *a priori* A. Le vecteur source spéculaire est :

$$W_{spe} = \int_0^{\alpha/2} \frac{1}{2}.\{[\frac{tg(\theta_i-\theta_t)}{tg(\theta_i+\theta_t)}]^2 + [\frac{\sin(\theta_i-\theta_t)}{\sin(\theta_i+\theta_t)}]^2\}.A.[\frac{\alpha^2}{4} - \Psi_{vv^*}^2].\sin\Psi_{vv^*}.d\Psi_{vv^*}.2\pi.W_{int}(\Omega_s) \qquad \text{où } \sin\theta_i = n.\sin\theta_t. \qquad \text{(I-26)}$$

On a $\sin\Psi_{vv^*} \approx \Psi_{vv^*} - \frac{1}{6}.\Psi_{vv^*}^3$ pour toute direction du cône de diffusion spéculaire si $\alpha << 1$. Par suite :

$$W_{spe} = \pi . W_{int}(\Omega_s) . \{[\frac{tg(\theta_i-\theta_t)}{tg(\theta_i+\theta_t)}]^2 + [\frac{sin(\theta_i-\theta_t)}{sin(\theta_i+\theta_t)}]^2\} . A . \int_0^{\alpha/2} [\frac{\alpha^2}{4} - \Psi_{vv*}^2] . [\Psi_{vv*} - \frac{1}{6}\Psi_{vv*}^3] . d\Psi_{vv*} \quad \text{(I-27)}$$

$$W_{spe} = \pi . W_{int}(\Omega_s) . \{[\frac{tg(\theta_i-\theta_t)}{tg(\theta_i+\theta_t)}]^2 + [\frac{sin(\theta_i-\theta_t)}{sin(\theta_i+\theta_t)}]^2\} . A . \frac{\alpha^4}{64} . [1 - \frac{\alpha^2}{72}] \quad \text{(I-28)}$$

Le facteur de réflectance direct-hémisphérique est donc :

$$\rho_{spe,dh}(\Omega_s) = \frac{W_{spe}}{W_{int}(\Omega_s)} = \pi . \{[\frac{tg(\theta_i-\theta_t)}{tg(\theta_i+\theta_t)}]^2 + [\frac{sin(\theta_i-\theta_t)}{sin(\theta_i+\theta_t)}]^2\} . A . \frac{\alpha^4}{64} . [1 - \frac{\alpha^2}{72}] \quad \text{(I-29)}$$

Avec l'hypothèse d'un rayonnement incident isotrope (*i.e.*, $L(\Omega_s)$ constante) sur une surface S et vu que $W_{int}(\Omega_s)=L(\Omega_s).S.\cos\theta_s.\Delta\Omega_s$ et $\Sigma_i \cos\theta_i.\Delta\Omega_i = 2\pi.\Sigma_i \cos\theta_i.\sin\theta_i.\Delta\theta_i \approx \pi$, on a :

$$\rho_{spe,hh}(\Omega_s) = \frac{\int W_{spe} . d\Omega_s}{\int W_{int}(\Omega_s) . d\Omega_s} \approx \frac{\Sigma_i \pi . \{[\frac{tg(\theta_i-\theta_t)}{tg(\theta_i+\theta_t)}]^2 + [\frac{sin(\theta_i-\theta_t)}{sin(\theta_i+\theta_t)}]^2\} . A . \frac{\alpha^4}{64} . [1 - \frac{\alpha^2}{72}] . L . S . \cos\theta_i . \Delta\Omega_i}{\Sigma_i L . S . \cos\theta_i . \Delta\Omega_i} \quad \text{(I-30)}$$

Le facteur de réflectance hémisphérique-hémisphérique peut être approché par :

$$\rho_{spe,hh}(\Omega_s) \approx \pi . A . \frac{\alpha^4}{32} . [1 - \frac{\alpha^2}{72}] . \Sigma_i \{[\frac{tg(\theta_i-\theta_t)}{tg(\theta_i+\theta_t)}]^2 + [\frac{sin(\theta_i-\theta_t)}{sin(\theta_i+\theta_t)}]^2\} . \cos\theta_i . \sin\theta_i . \Delta\theta_i \quad \text{(I-31)}$$

$\rho_{spe,hh}(\Omega_s)$ est calculé par le module *phase* qui le stocke dans le fichier "*coeff_diff.src*" (*cf.* I.5.1).

W_{spe} est égal à la diffusion spéculaire théorique (Fresnel) pondérée par le facteur $\pi.A.\frac{\alpha^4}{32}.[1-\frac{\alpha^2}{72}]$, normalement inférieur à 1. Etant réfléchi dans un cône de demi angle $\alpha/2$, il doit être distribué dans tous les D cônes angulaires $(\Omega_v,\Delta\Omega_v)$ qui intersectent le cône spéculaire $\Delta\Omega_v^{'}=2\pi.(1-\cos\frac{\alpha}{2})$.

Le vecteur source spéculaire $W_{spe}(\Omega_v,\Delta\Omega_v)$ selon toute direction $(\Omega_v,\Delta\Omega_v)$ doit être inférieur à W_{spe}, avec $\Sigma_D W_{spe}(\Omega_v,\Delta\Omega_v) = W_{spe}$. Il est nul hors du cône spéculaire. Dans celui-ci, il vaut :

$$W_{spe}(\Omega_v,\Delta\Omega_v) \approx W_{spe} . \frac{\Delta\Omega_v^{'} . [\frac{\alpha^2}{4} - \Psi_{vv*}^2]}{\Sigma \Delta\Omega_v^{'} . [\frac{\alpha^2}{4} - \Psi_{vv*}^2]} \quad (\Delta\Omega_v^{'} \approx \Delta\Omega_v \text{ si } \Delta\Omega_v < \Delta\Omega_v^{*} \text{ et } \Delta\Omega_v^{'} \approx \Delta\Omega_v^{*} \text{ si } \Delta\Omega_v > \Delta\Omega_v^{*}) \quad \text{(I-32)}$$

L'algorithme implémenté comprend 3 étapes :

a) Détermination des composantes (θ_v^*,ϕ_v^*) de la direction spéculaire (Ω_v^*).
Soit β l'angle entre la normale Ω_n à la surface et la direction incidente Ω_i. Pour tout Ω_i, $\beta=\theta_v^*$, les 3 vecteurs $\vec{\Omega}_i$, $\vec{\Omega}_v^*$ et $\vec{\Omega}_n$ doivent être coplanaires et l'angle de phase $(\vec{\Omega}_i, \vec{\Omega}_v^*) = 2.\beta$. Avec la notation de la *Figure I.21* et ($\theta_s=\pi-\theta_i$, $\phi_s=\phi_i$), $\vec{\Omega}_v^*$ est calculé à partir de : $\vec{\Omega}_v^* + \vec{\Omega}_s = 2\cos\beta\,\vec{\Omega}_n$

b) Détermination des D directions qui satisfont $|\Psi_{vv*}| < \frac{\alpha}{2}$.

c) Calcul de $\Delta\Omega_v^{'} . [\frac{\alpha^2}{4} - \Psi_{vv*}^2]$ pour chaque direction.

La polarisation due à la réflectance spéculaire est modélisée, mais seulement pour la diffusion d'ordre 1 (itération k = 1), et sans prendre en compte la polarisation du rayonnement incident :

$$W_{pol}(\Omega_v,\Delta\Omega_v) \approx W_{spe}(\Omega_v,\Delta\Omega_v).\frac{R_V-R_H}{R_V+R_H} \quad \text{avec } R_V = [\frac{\sin(\theta_i-\theta_t)}{\sin(\theta_i+\theta_t)}]^2 \quad \text{et} \quad R_H = [\frac{tg(\theta_i-\theta_t)}{tg(\theta_i+\theta_t)}]^2 \qquad \text{(I-33)}$$

Les diffusions multiples (*i.e.* k > 1) sont modélisées en supposant que la figure a un facteur de réflectance lambertien égal à $\rho_{lamb} + \rho_{spe,hh}$.

3) <u>*Diffuseur "Hapke étendu" + "spéculaire"*</u> : $\rho(\Omega_s,\Omega_v) = \rho_{Hapke}(\Omega_s,\Omega_v) + \rho_{spec}(\Omega_s,\Omega_v)$

Le terme spéculaire $\rho_{spec}(\Omega_s,\Omega_v)$ est celui du cas "Lambertien + Spéculaire". Le terme $\rho_{Hapke}(\Omega_s,\Omega_v)$ dérive d'un modèle (Hapke, 1993) qui assimile le sol à un milieu plan composé de particules disposées aléatoirement, grandes devant λ et d'albédo (ω), avec une fonction de phase $P(g_1,g_2)$, approchée par un polynôme de Legendre, qui simule la rétrodiffusion et la diffusion vers l'avant (Jacquemoud *et al.,* 1992). L'angle de phase g_1 est l'angle entre la direction incidente solaire (Ω_s) et la direction d'observation (Ω_v). L'angle "d'anti-phase" g_2 est l'angle entre la direction spéculaire (Ω_v^*) et (Ω_v) :

$$\rho_{Hapke}(\Omega_s,\Omega_v,\Omega_n) = \frac{\omega}{4}\frac{1}{\cos(\psi_{vn}) + |\cos(\psi_{sn})|}.[[1+B(g_1)].P(g_1,g_2)+H(\omega,|\cos(\psi_{sn})|).H(\omega,\cos(\psi_{vn}))-1] \qquad \text{(I-34)}$$

$$B(g_1) = \frac{B_0}{1+\frac{1}{h}.\tan(\frac{g_1}{2})} \qquad H(\omega,x) = \frac{1+2.x}{1+2.\gamma.x} \qquad \gamma = (1-\omega)^{0.5} \qquad \text{(I-35)}$$

où B(g) représente le *hot spot* caractérisé par 2 termes, B_o et h (rugosité du milieu), qui décrivent respectivement l'amplitude et la largeur du pic de rétrodiffusion.

$$P(g_1,g_2) = 1 + b_1.\cos g_1 + c_1.\frac{3.\cos^2(g_1)-1}{2} + b_2.\cos(g_2) + c_2.\frac{3.\cos^2(g_2)-1}{2} \qquad \text{(I-36)}$$

La réflectance totale $\rho(\Omega_s,\Omega_v) = \rho_{Hapke}(\Omega_s,\Omega_v) + \rho_{spec}(\Omega_s,\Omega_v)$ est donc modélisée avec 10 paramètres : $\{\omega, B_o, h, b_1, c_1, b_2, c_2\} + \{A, \alpha, n\}$.

Dans le cas du modèle "Hapke classique" (*i.e.* $b_2 = c_2 = g_2 = 0$), les diffusions multiples (k > 1) sont calculées avec le facteur de réflectance ρ_{hd} de Hapke (1993). Par suite, la réflectance directionnelle est :

$$<\rho(\Psi_{nv})> = \frac{1-(1-\omega)^{0.5}}{1+2.(1-\omega)^{0.5}.\cos\Psi_{nv}} + \rho_{spe,hd}(\Omega_v) \qquad \text{(I-37)}$$

Dans les autres cas, les diffusions multiples sont gérées en supposant que la surface est lambertienne avec un facteur de réflectance calculé par le module *phase*.

4) <u>*Fonction de phase prédéterminée*</u> :

Ce cas n'est possible que pour une surface horizontale. La réflectance est représentée par une fonction de phase qui peut être dérivée de mesures terrain ou calculée par un modèle T-R (*e.g.*, Cierniewski *et al.*, 1996-1997; Liang *et al.*, 1996). Elle est doit être assimilée à un diffuseur soit "Lambertien + spéculaire" soit "Hapke + spéculaire". Suivant le type de diffuseur, le module phase calcule les 3 fonctions de transfert associées $T_d(\Omega_s,\Omega_v)$, $T_{spe}(\Omega_s,\Omega_v)$ et $T_{pol}(\Omega_s,\Omega_v)$. Ce mode de fonctionnement accélère le temps de calcul du module *dart*, car il évite à celui-ci le calcul de la réflectance.

I.3.2 Mécanismes d'émission

Une surface opaque (*Figure I.22*) de température T, aire S, normale (Ω_n) et absorptance $\alpha_a(\lambda,T,\Omega_v)$ (*i.e., %* du rayonnement intercepté qui est absorbé) émet dans le cône ($\Omega_v,\Delta\Omega_v$) la puissance :

$$W_e(\lambda,T,\Omega_v) = \alpha_a(\lambda,T,\Omega_v).L_B(\lambda,T).S.\cos(\Psi_{vn}).\Delta\Omega_v \qquad \text{où } \cos(\Psi_{vn}) = |\Omega_v.\Omega_n| \tag{I-38}$$

où $L_B(\lambda,T)$ est la luminance d'un corps noir à la température T calculée par la loi de Planck.

La loi de Kirchhoff indique l'égalité de $\alpha_a(\lambda,T,\Omega_v)$ et de l'émissivité directionnelle $\varepsilon_d(\lambda,T,\Omega_v)$ *i.e.*, l'efficacité d'émission du corps par rapport à celle théorique du corps noir à la même température :

$$\varepsilon_d(\lambda,T,\Omega_v) = \alpha_a(\lambda,T,\Omega_v) \tag{I-39}$$

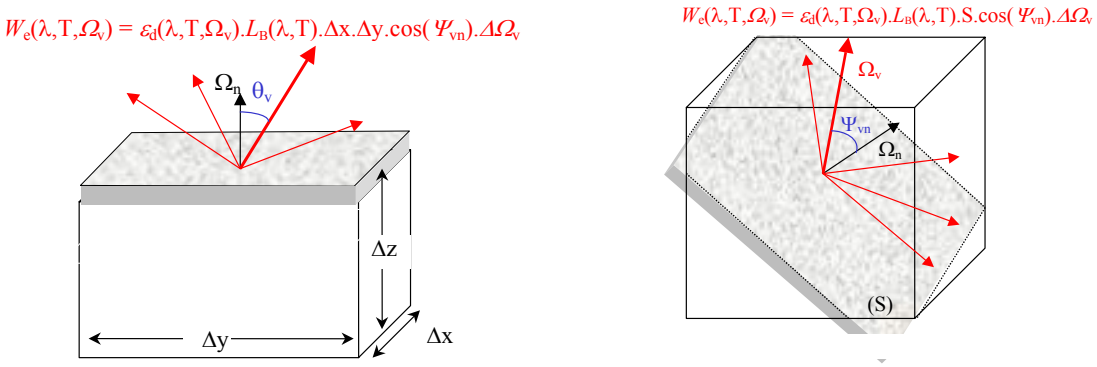


Figure I.22 : Surface de normale Ω_n vue selon la direction $\Omega_v(\theta_v,\phi_v)$.

La réflectance direct-hémisphérique d'une surface opaque vérifie la relation : $\rho_{dh}(\lambda,T,\Omega_v) = 1 - \alpha_a(\lambda,T,\Omega_v)$

D'autre part, pour tout corps à l'équilibre thermodynamique et en l'absence de mécanismes d'échange d'énergie autres que radiatifs, $\rho_{dh}(\lambda,T,\Omega_v) = \rho_{hd}(\lambda,T,\Omega_v)$ (Hapke, 1993).

L'émissivité s'écrit donc : $$\varepsilon_d(\lambda,T,\Omega_v) = 1 - \rho_{hd}(\lambda,T,\Omega_v) \tag{I-40}$$

Le flux émis par une figure plane dépend de T, $\varepsilon_d(\lambda,T,\Omega_v)$ et de la surface d'intersection S "figure – cellule" projetée selon Ω_v, soit S.cos(Ψ_{vn}). La surface S est calculée par une méthode vectorielle (Boyat, 2001).

Il existe 4 types d'émissivité, correspondant aux 4 types de diffusion possibles :

1) *Émissivité d'un diffuseur lambertien de réflectance lambertienne {$\rho_{lamb}(\lambda,T)$, écart type σ_ρ}*

$$\varepsilon_d(\lambda,T) = 1 - \{\rho_{lamb};\sigma_\rho\} \tag{I-41}$$

2) *Émissivité d'un diffuseur "lambertien + spéculaire"*

La composante spéculaire est calculée à partir du facteur de réflectance direct-hémisphérique $\rho_{spe,dh}(\Omega_v)$. La polarisation associée n'est pas prise en compte.

$$\varepsilon_d(\lambda,T,\Omega_v) = 1 - \{\rho_{lamb} + \rho_{spe,dh}(\Omega_v)\} \tag{I-42}$$

3) *Émissivité d'un diffuseur "Hapke (1993) étendu* $<\rho>$ *+ spéculaire"*

$$\varepsilon_d(\lambda,T,\Omega_v) = 1 - \{<\rho> + \rho_{spe,dh}(\Omega_v)\} \tag{I-43}$$

Si "$b_2=c_2=g_2=0$", on a : $$\varepsilon_d(\lambda,T,\Omega_v) = (1-\omega)^{0.5}.\frac{1+2.\cos\Psi_{vn}}{1+2(1-\omega)^{0.5}.\cos\Psi_{vn}} - \rho_{spe,dh}(\Omega_v) \tag{I-44}$$

4) *Émissivité associée à une fonction de phase pré-définie*

L'émissivité correspond aux cas "Lambertien + spéculaire" ou "Hapke + spéculaire".

I.3.3 Point origine du rayonnement diffusé ou émis

L'origine du rayonnement thermique d'une surface opaque est son barycentre "géométrique". Il diffère donc en général du point "origine" des rayons diffusés (*i.e.*, toute itération du mode (R) et toute itération du mode (T) différente de 1), car celui-ci dépend des points d'interception des rayons incidents.

L'intersection entre un rayon et une figure dans une cellule "Opaque_MNT" (*e.g. Sol_MNT, Plot_MNT, etc.*) ou "Urbain" (*Toit, Tronc, etc.*) ou *Opaque_nT* est modélisée en 2 étapes :

1) Détermination s'il existe ou non un point d'intersection (M) entre le rayon incident (*i.e.*, demi droite repérée par $W_1(\Omega_s)$, $W_2(\Omega_s)$, $W_3(\Omega_s)$, $W_4(\Omega_s)$ dans la *Figure I.23*) sur la cellule et le plan {"3 points + vecteur normal Ω_n"} de toute figure comprise pour tout ou partie dans la cellule.

2) Si le point d'interception (M) existe, il est déterminé s'il est dans la cellule, avec un test d'encadrement de ses coordonnées. Il est aussi déterminé si (M) est sur la figure, avec les 2 étapes :
   a) Changement de repère pour exprimer les coordonnées de (M) dans celui de la figure.
   b) Application de N inéquations (*i.e.*, N contraintes) sur les coordonnées de (M). Le nombre N est le nombre de cotés de la figure en question.

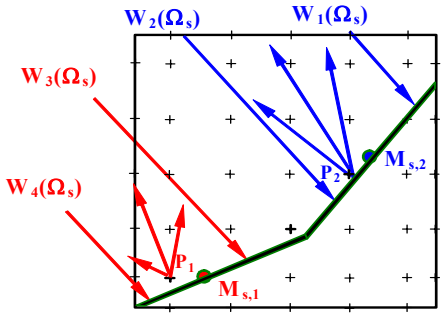


Figure I.23 : Interception de 4 rayons incidents par 2 figures. W_1 et W_2 sont interceptés par la figure 2 et W_3 et W_4 par la figure 1. Les points d'émission effectifs résultants sont P_2 et P_1.

L'attribution d'un point d'émission prédéfini (*i.e.*, points "origine") est réalisée en 2 étapes :

1) Pour chaque figure interceptrice, détermination du point d'émission "exact" par une méthode barycentrique similaire à celle utilisée pour les cellules feuilles : quand un rayon intersecte une figure dans une cellule, le nouveau point d'émission "exact" de cette figure est le barycentre "énergétique" de ce point d'intersection et du point d'émission "exact" avant cette intersection (*e.g.*, $M_{s,1}$ et $M_{s,2}$ dans la *Figure I.23*). Ce calcul tient compte de l'énergie véhiculée par le rayon. Cette valeur n'est jamais réinitialisée au cours des différentes diffusions. Etant un barycentre, tout point d'émission est donc toujours sur la figure.

2) Détermination du point d'origine effectif (*e.g.* P_1 et P_2 dans la *Figure I.23*) parmi les $(N_{sc}^3 + 6N_{sf}^2)$ points qui échantillonnent la cellule. Le centre de la sous cellule (appelé "sous centre") qui contient (M_{si}) est tout d'abord déterminé par seuillage des coordonnées de (M_{si}). Tout point P_i doit être le plus proche possible de (M_{si}) et vérifier les 2 conditions suivantes :
   a) (P_i) est à l'extérieur du volume délimité par la figure plane émettrice.
   b) aucune figure ne se trouve entre (P_i) et (M_{si}).

L'intérêt des points effectifs est que tous les trajets possibles dont ils sont l'origine sont pré-calculés (Figure I.11). Le choix de (P_i) au lieu de (M_{si}) entraîne cependant une approximation géométrique, mais ne modifie pas le bilan radiatif (*i.e.*, conservation de l'énergie).

Le point effectif P_i est déterminé à partir de tests sur les sens des vecteurs "sous-centre → figure" et Ω_n :

a) S'ils ne sont pas opposés et si aucune figure n'existe entre (M_{si}) et (P_i), le sous-centre est accepté.

b) S'ils sont opposés, le sous centre est décalé d'une sous-maille ($\pm\Delta X/N_{sc}$, $\pm\Delta Y/N_{sc}$ ou $\pm\Delta Z/N_{sc}$) selon l'axe (Ox, Oy ou Oz) où la valeur absolue de la composante en x, y ou z de Ω_n est maximale. Le sous-centre résultant est hors du volume délimité par la figure. S'il est hors de la cellule, un sous centre est alors systématiquement recherché parmi tous les centres des $6N_{sf}^2$ sous faces possibles.

Si aucun sous-centre n'est trouvé, le sous-centre est cherché parmi tous les N_{sc}^3 sous centres, à partir des plus proches. S'il n'est malgré tout trouvé aucun point, l'énergie est alors perdue. Le terme "*never*" et le niveau où survient la perte s'affichent alors sur l'écran de l'utilisateur. De plus, l'énergie perdue est stockée dans la variable "énergie totale perdue". Cette énergie perdue s'est toujours avérée négligeable.

I.3.4 Suivi de rayon diffusé ou émis

Les cellules de type "Opaque_plat" (*e.g. Sol*, *Eau*,...) n'émettent que depuis leur face supérieure (*Figure I.20a*), à priori depuis le centre de cette face. L'image "horizontale". Si un motif (*e.g.* mur, tronc,...) surmonte le centre de la face supérieure de ces cellules, le point origine est décalé hors du motif, sur la face supérieure de la cellule, du côté où le motif intercepte le plus d'énergie.

Dans une cellule contenant une figure, l'interaction "rayon-matière" survient sur la portion de la figure dans la cellule. Le trajet d'un rayon issu d'un point d'émission effectif (P_i) de la cellule comprend 2 parties (*i.e.*, 2 listes chaînées pré-calculées) : trajet jusqu'au point d'intersection (Q_i) du rayon avec le plan horizontal (inférieur ou supérieur) qui borne la cellule qui inclue le sous centre, puis trajet depuis le point (E_i) du plan le plus proche de (Q_i) (*Figure I.11*). Trois difficultés (*Figure I.24*) apparaissent souvent :

- Décalage géométrique (cas 1) entre les point (Q_i) et (E_i).
- Passage sous la figure (cas 2) dans la cellule suivante. Si le segment entre les points (Q_i) et (E_i) intersecte une figure, l'énergie est attribuée à la première figure intersectée.
- Intersection du rayon par une figure dans la cellule origine (cas 3). Si le segment [Q_iE_i] intersecte une figure de la cellule, l'énergie du rayon est allouée à la figure la plus proche.

De plus, tout rayon incident sur la face interne d'une portion de surface plane est stoppé. En mode (R) cette approximation n'entraîne pas d'erreur radiométrique, car aucun rayon ne peut provenir de l'intérieur d'éléments de paysage. Ce n'est pas le cas en mode (T), car tout élément, même dans un bâtiment, a une température non nulle et émet donc un rayonnement.

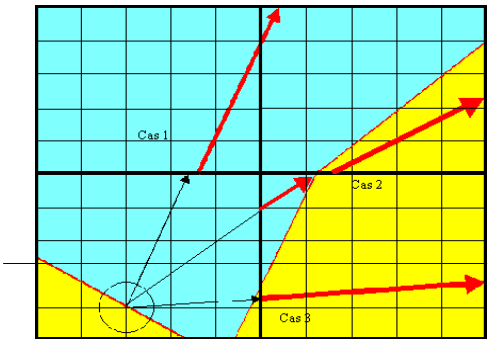


Figure I.24: Illustration de 3 difficultés associées au suivi de rayons depuis la cellule origine. Trajets précalculés dans la cellule origine (noir) et dans les cellules voisines (rouge).

L'emploi de cellules qui incluent des surfaces opaques, au lieu de cellules totalement opaques (*e.g.* cellules *Sol*), améliore les simulations. Ainsi, un plan homogène (Mathiaud, 2000), isolé et éclairé uniformément tend à avoir un aspect uniforme. Des défauts subsistent cependant. En effet, lors d'un éclairement direct incident sur un plan incliné, la densité surfacique d'énergie interceptée par cellule n'est pas constante, en raison de la discrétisation spatiale de la maquette et de l'éclairement (Handbook, 2006). Cette hétérogénéité dépend de la direction d'observation par rapport à l'orientation du plan. L'augmentation du nombre de sous-centres d'émission par cellule de la couche fictive (*e.g.*, n = 7) réduit cet effet, mais accroît la mémoire requise pour stocker le plus grand nombre de trajets précalculés.

Diverses difficultés ont surgi du fait de la modélisation du transfert radiatif dans un milieu simulé avec des figures opaques. La Figure I.25 illustre un problème du à la discontinuité de l'éclairement de surfaces planes coplanaires adjacentes au sein d'une même cellule. Cette discontinuité est due à la discrétisation de l'éclairement. Il a été résolu en affectant à toutes les surfaces le même éclairement à l'aide d'une moyenne des éclairements pondérée par les surfaces des figures concernées. Un problème équivalent a été résolu pour ce qui est de l'attribution des températures à des surfaces coplanaires d'une même cellule.

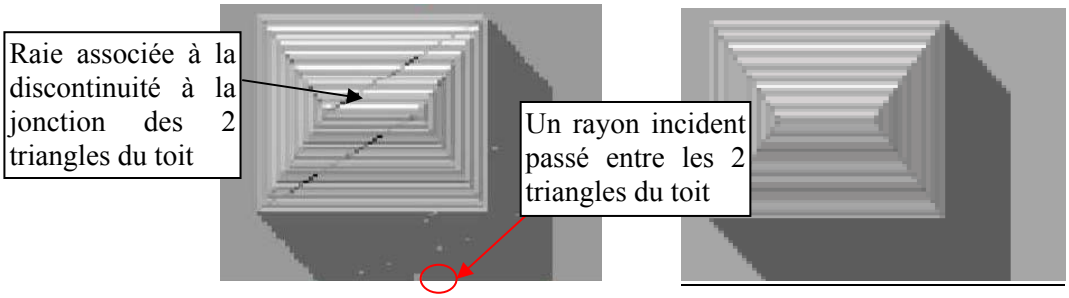


Figure I.25 : Problème du à la réflectance de figures planes coplanaires adjacentes dans une même cellule

I.4 DIFFUSION ET ÉMISSION DES MILIEUX TURBIDES ET MIXTES

De manière à réduire les temps calculs lors de la simulation du T-R, le module *Phase* pré-calcule certaines propriétés optiques des milieux turbides. Ainsi, il calcule certaines intégrations associées aux mécanismes d'interception, de diffusion et d'émissions thermique. Dans le cas d'un fonctionnement monospectral (R ou T) sans emploi de la base de données atmosphériques, ces pré-calculs sont effectués à partir de paramètres entrés par l'opérateur. Pour les autres fonctionnements, ils sont effectués à partir de

bases de données : propriétés optiques spectrales des sols et de la végétation (c*f.* I.5.1) et propriétés structurelles et optiques de l'atmosphère (*cf.* I.2.3). Les paragraphes qui suivent décrivent le calcul de certaines quantités spectrales foliaires (*e.g.*, transmittance par unité de densité volumique foliaire et diffusion volumique foliaire).

I.4.1 Transmission et Interception du rayonnement

Une cellule foliaire de type *j* est traitée en tant que milieu turbide *i.e.* homogène et constitué d'éléments isotropes (*e.g.* feuilles) de normale $\Omega_f(\theta_f;\varphi_f)$ et de dimensions très supérieures à la longueur d'onde (λ). La densité volumique $u_f(i)$ ($m^2.m^{-3}$) est la quantité de matière verte par unité de volume de la cellule *i*. Son intégration verticale sur la hauteur ΔZ du couvert donne l'indice foliaire (LAI) défini comme la moitié de la surface foliaire par unité de surface au sol : $\int_{\Delta Z} u_f.dz$. Dans le domaine spectral du rayonnement solaire réfléchi ($\lambda < 4\mu m$), les 2 mécanismes majeurs d'interaction onde-matière sont l'absorption et la diffusion : tout flux intercepté est soit absorbé soit diffusé. Ils sont caractérisés par les coefficients d'extinction (m^{-1}) respectifs (α_a) et (α_d) qui varient spectralement. Le coefficient macroscopique total α (*i.e.* $\alpha_a + \alpha_d$) qui représente la probabilité qu'un photon atteigne une feuille après un trajet unité (Myneni *et al.*, 1991) est :

$$\alpha(i,\Omega_n) = u_f(i).G(j,\Omega_n) \qquad \text{(I-45)}$$

où le facteur géométrique $G(j,\Omega_n)$ donne la fraction de surface foliaire efficace selon la direction (Ω_n):

$$G(j,\Omega_n) = \frac{1}{2\pi}.\int_0^{2\pi} d\phi_f \int_0^1 g_f(j,\Omega_f).|\Omega_n.\Omega_f|.d\Omega_f \qquad \text{(I-46)}$$

Le facteur de transmission associé à un trajet Δl_i dans la cellule *i* selon la direction (Ω_n) est donc :

$$T(\Delta l_i,\Omega_n) = \exp[-G(j,\Omega_n).u_f(i).\Delta l_i] \qquad \text{(I-47)}$$

La fonction de distribution des normales foliaires suit une loi $g_f(j,\Omega_f)/2\pi$ (sr^{-1}), indépendante des N_{dir} directions discrètes. Aussi appelée LAD (Leaf Angle Distribution), elle donne la probabilité que la normale à la surface supérieure d'une feuille soit dans l'angle solide unité autour de $\Omega_f(\theta_f,\phi_f)$. Toutes les faces foliaires supérieures étant dirigées vers l'hémisphère supérieur ($2\pi^+$), on a (Ross, 1981) :

$$\frac{1}{2\pi}.\int_0^{2\pi^+} d\phi_f \int_0^1 g_f(z,\Omega_f).d\mu_f = 1 \qquad \text{(I-48)}$$

La symétrie azimutale de $g_f(z,\Omega_f)$ permet de définir la LIDF (Leaf inclination density function) :

$$g_f^*(\theta_f) = \langle g_f(z,\Omega_f)\rangle_{\Phi_f} = \int_{2\pi} \frac{g_f(\theta_f,\phi_f)}{2\pi}\, d\Phi_f\ (rad^{-1}) = g_f(\theta_f).\sin(\theta_f) \qquad \left(\int_0^{\frac{\pi}{2}} g_f^*(\theta_f).d\theta_f = 1\right) \qquad \text{(I-49)}$$

L'angle foliaire moyen (Average Leaf Angle) est : $$ALA = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \theta_f.g_f^*(\theta_f).d\theta_f \qquad \text{(I-50)}$$

$g_f(\theta_f)$ et $g_f^*(\theta_f)$ varient avec le type de végétation et parfois durant la journée (héliotropisme, vent).

Le module *Phase* simule les distributions horizontale *i.e.*, $g_f^*(\theta_f)=\delta(\frac{\pi}{2})$ et verticale *i.e.*, $g_f^*(\theta_f)=\delta(0)$, 2 LADs (ellipsoïdal et elliptique) définis par un nombre limité de paramètres, le LAD sphérique (densité constante par stéradian) et 5 LAD définis par De Wit (1965) pour étudier la photosynthèse des couverts végétaux :

planophile (plutôt horizontal), érectophile (plutôt vertical), plagiophile (surtout oblique), extrémophile (surtout non oblique) et uniforme (densité constante / degré).

Le LAD sphérique et les 5 LADs de DeWit (1965) sont souvent calculés avec les 2 expressions équivalentes suivantes (le module *Phase* utilise par défaut la 1ère) :

$$g_f(\theta_f) = A.\cos^m[\frac{\pi}{2}\frac{\theta - \theta_o}{\theta_2 - \theta_o}] \quad \text{(I-51)}$$

où θ_1 et θ_2 sont les bornes de la distribution foliaire et $\theta_o \in [\theta_1 \ \theta_2]$ est le centre de cette distribution.

$$\overset{\text{trigo.}}{g_f(\theta_f)} = \frac{2}{\pi}\frac{a+b.\cos(2c.\theta_f) + d.\sin\theta_f}{\sin\theta_f} \quad \text{(I-52)}$$

où $\theta_f \in [0\ \frac{\pi}{2}]$ et a, b, c, d sont des constantes définies pour chaque distribution (Bunnick, 1978).

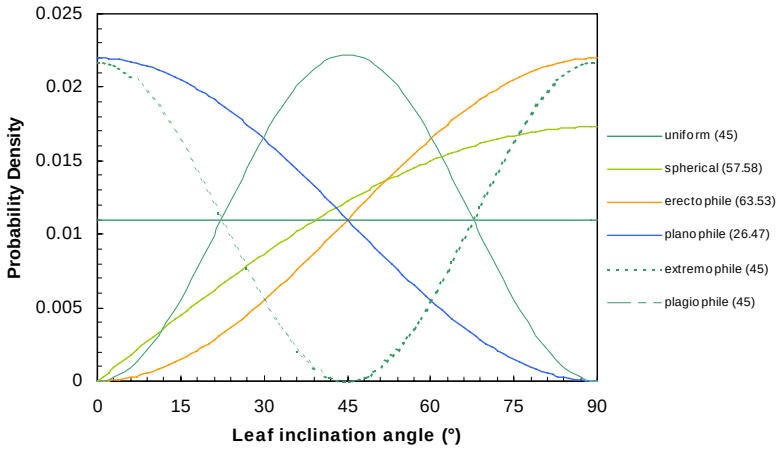
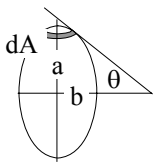


Figure I.26: 6 LAD calculés à partir des fonctions trigonométriques (Bunnick, 1978). Angle foliaire moyen ALA (°) entre parenthèse.

Le LAD est un paramètre majeur, car son impact sur la réflectance des couverts homogènes équivaut à celui du LAI (Bacour, 2002). Lors de l'inversion d'un modèle de réflectance, le LAD ne devrait donc pas être fixé, sauf s'il est connu. Il en résulte que les LAD paramétriques ci-dessus ne sont pas adaptés au mode inverse, sauf si le type de LAD est connu (Jacquemoud *et al.*, 2001). Ce problème est résolu ici avec 2 fonctions qui simulent tout LAD avec un nombre réduit de paramètres (Figure I.27, Tableau I.4).

a) <u>*LAD ellipsoïdal*</u>. C'est une généralisation du LAD sphérique (Campbell, 1990) : g_f^* est similaire à la distribution d'éléments d'aire à la surface d'un ellipsoïde. Par suite :

$$g_f(\theta_f) = \frac{dA}{\text{Aire de l'ellipsoïde}} = \frac{2\chi^3}{\Lambda(\cos^2\theta_f + \chi^2\sin^2\theta_f)^2} \quad \text{où } \theta_f \in [0\ \frac{\pi}{2}] \quad \text{(I-53)}$$



- χ : Rapport des demi axe horizontal *b* et vertical *a* de l'ellipsoïde. $\chi = -3 + \left(\frac{ALA}{9.65}\right)^{-1/1.65}$ avec *ALA* en radians. χ impose la forme de la distribution (*e.g.*, LAD sphérique *i.e.*, ALA ≈ 56.137° si $\chi = 1$, LAD horizontal si $\chi \to \infty$, et feuilles strictement verticales si $\chi \to 0$)
- Λ : surface de l'ellipsoïde divisée par $2\pi b^2$. Elle est approchée par : $\Lambda = \chi + 1.774.(\chi + 1.182)^{-0.733}$

$$\chi < 1 : \Lambda = 1 + \frac{1}{\chi.\sqrt{1-\chi^2}}.\arcsin(\sqrt{1-\chi^2}) \qquad \chi > 1 : \Lambda = 1 + \frac{1}{2\chi^2.\sqrt{1-\chi^{-2}}}.\ln[\frac{1+\sqrt{1-\chi^{-2}}}{1-\sqrt{1-\chi^{-2}}}] \qquad \chi = 1 : \Lambda = 2$$

b) *LAD elliptique*. Ce LAD généralise le LAD ellipsoïdal (Kuusk, 1995) en introduisant l'angle modal d'inclinaison des axes principaux de l'ellipse θ_m. L'expression analytique de la distribution elliptique est une formulation à deux paramètres d'une ellipse en coordonnées polaires :

$$g_f(\theta_f) = \frac{B_g}{\sqrt{1-\varepsilon^2\cos^2(\theta_f - \theta_m)}} \qquad \text{(I-54)}$$

- Excentricité $\varepsilon = \sqrt{1-\left(\frac{a_e}{b_e}\right)^2}$. Elle détermine la forme de la distribution. Si $\varepsilon = 0$, le LAD tend à être sphérique. Si $\varepsilon = 1$, le LAD tend vers une direction fixée par $\theta_f = \theta_m$.
- Facteur de normalisation $B_g = \frac{\varepsilon}{\sin\theta_m.\ln\frac{\cos\eta + \sin\nu}{\cos\nu + \sin\eta} + (\eta - \nu).\cos\theta_m}$ où $\eta = \sin^{-1}(\varepsilon.\cos\theta_m)$ et $\nu = \sin^{-1}(\varepsilon.\sin\theta_m)$

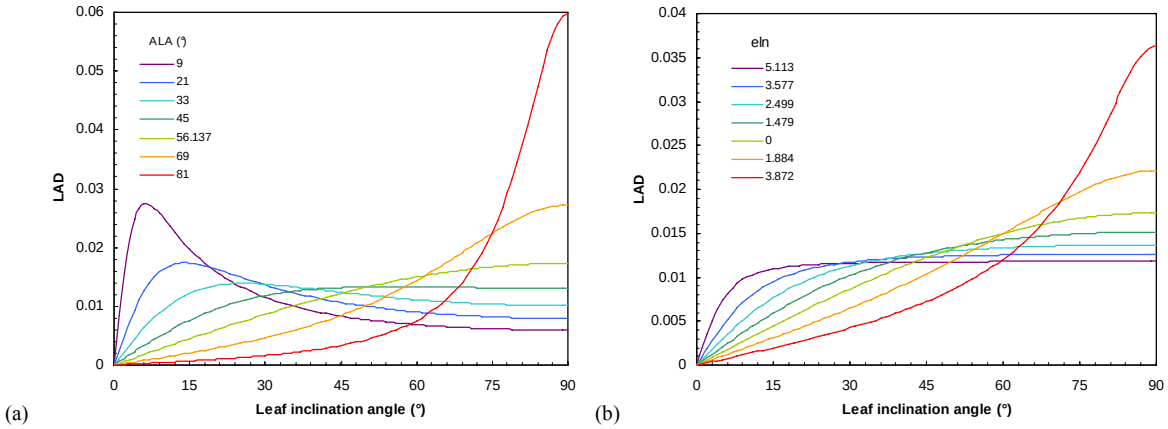


Figure I.27 : LAD $g_f(\theta_f)$ ellipsoïdal (a) et elliptique (b) pour 7 angles foliaires moyens ALA (°).

ALA (°)	χ	eln	θ_m (°)
9	9.129	5.113	0
21	4.259	3.577	0
33	2.519	2.499	0
45	1.574	1.479	0
56.137	1	0	0
69	0.53	1.884	90
81	0.203	3.872	90

Tableau I.4: Valeurs de χ , eln = -ln(1- ε) et θ_m pour différents ALA. Le formalisme est celui de la distribution ellipsoïdale ($\theta_m = 0°$ si $\chi \geq 1$ et $\theta_m = 90°$ si $\chi < 1$).

Seul le module *Phase* manipule le LAD. Ainsi, de manière à éviter au module *Dart* le calcul itératif (coûteux en temps calcul) d'intégrales sur les angles foliaires, il pré-calcule la transmittance $T(j,\Omega_n) = \exp[-G(j,\Omega_n)]$, pour une densité foliaire unité et un trajet unité. C'est une matrice à 2 dimensions J'xN_{dir} avec $j \in [1\ J']$ et $n \in [1\ N_{dir}]$, où J' est le nombre total d'espèces foliaires présentes. Par la suite, le module "*dart*" calcule pour toute cellule le facteur de transmission d'une cellule *i* traversée sur un trajet Δl_i :

$$T(\Delta l_i,\Omega_n) = [T(j,\Omega_n)]^{uf(i).\Delta li} \qquad \text{(I-55)}$$

Dans le cas d'un rayon incident $W_{in}(0, \Omega_n)$ avec un trajet Δl_i, l'énergie transmise est :

$$W_{trans}(\Delta l_i,\Omega_n) = T(\Delta l_i,\Omega_n).W_{in}(0,\Omega_n) \quad \text{(I-56)}$$

L'énergie interceptée sur ce trajet $(\Delta l_i,\Omega_n)$ est : $W_{int}(\Delta l_i,\Omega_n) = [1 - T(\Delta l_i,\Omega_n)].W_{in}(0,\Omega_n)$ (I-57)

Des travaux ont mis en évidence, surtout dans les milieux hétérogènes (*e.g.* forêts de conifères), que le facteur de transmission $T(\Delta l_i,\Omega_n)$ mesuré, dévie de la loi classique de Beer-Lambert. Pour remédier à ce phénomène Nilson (1971) a introduit un indice d'agrégation Ω_E par espèce biologique (*clumping index* dans la terminologie anglaise). Dans le cas de la simulation d'un couvert arboré en tant que milieu turbide, cet indice tient compte à la fois de l'agrégation du feuillage dans les houppiers et de l'arrangement spatial des houppiers (Chen et Black, 1991). Chen *et al.* (1999; 2003) ont montré que le remplacement du LAI (u_f) par l'indice foliaire effectif $LAI_E = LAI.\Omega_E$ ($u_{fE} = u_f.\Omega_E$) améliore l'estimation journalière de la photosynthèse des forêts de conifères. En effet, Ω_E permet de simuler plus précisément la proportion de feuilles à l'ombre ou au soleil (Lacaze *et al.*, 2002). De plus, la densité foliaire dérivée d'images de télédétection est à priori plutôt u_{fE} que u_f. Ceci explique l'intérêt des mesures multidirectionnelles pour estimer non seulement $\Omega_E(j)$ mais aussi $\Omega_E(j,\theta_n)$ (Kucharik *et al.*, 1999).

Le module *Phase* modélise la dépendance angulaire de LAI_E dans (I-47) en pondérant $G(j,\theta_n)$ par une sigmoïde à quatre paramètres :

$$\Omega_E(j,\theta_n) = \frac{\Omega_{E,max}(j)}{1+\exp[-a(j).(\theta_n - b(j))]} + \Omega_{E,min}(j) \quad \text{(I-58)}$$

où $\theta_n \in [0\ 90°]$, $\Omega_{E,max} = 0$ et $\Omega_{E,min} = 1$ (a = b = 0), pour toute espèce foliaire.

Si $\Omega_{E,max} = \Omega_{E,min} = a$, il est utilisé la formulation de Chen et Black (1991) : $\Omega_E(j,\theta_n) = a(j) + b(j).\theta_n$

I.4.2 Diffusion volumique d'une cellule turbide

La diffusion dans une cellule turbide est définie par la fonction de phase volumique $\frac{P(\Omega_s,\Omega_v)}{4\pi}$ *i.e.* la probabilité qu'un photon provenant de la direction Ω_s soit diffusé dans l'angle solide unité centré sur Ω_v :

$$\frac{P(\Omega_s,\Omega_v)}{4\pi} = \frac{\int_{2\pi} \frac{g_f(j,\Omega_f)}{2\pi}.|\Omega_s.\Omega_f|.f(j,\Omega_f,\Omega_s \rightarrow \Omega_v).d\Omega_f}{G(j,\Omega_s)} \quad \text{(I-59)}$$

Cette fonction dépend de trois termes associés à l'espèce foliaire *j* présente dans la cellule :

1. la distribution foliaire des normales foliaires,
2. le facteur géométrique $G(j,\Omega_v)$, et
3. la fonction de diffusion $f(j,\Omega_s \rightarrow \Omega_v,\Omega_f)$

$f(j,\Omega_s \rightarrow \Omega_v,\Omega_f)$ donne la fraction du rayonnement incident dans la direction Ω_s qui est diffusée vers Ω_v par unité d'angle solide. Étant donné qu'un photon, intercepté par une feuille peut subir plusieurs réflexions et

réfractions (causées par la structure interne des feuilles) ou être réfléchi spéculairement par la cuticule, la fonction de diffusion est la somme de 2 composantes :

- Composante lambertienne $f_d(j,\Omega_s \rightarrow \Omega_v,\Omega_f)$ associée à une diffusion interne volumique;
- Composante spéculaire $f_{sp}(j,\Omega_s \rightarrow \Omega_v,\Omega_f)$ liée aux mécanismes de diffusion surfacique.

Le terme $f_d(j,\Omega_s \rightarrow \Omega_v,\Omega_f)$ est un modèle bi-lambertien. Il dépend des réflectances hémisphériques foliaires supérieure ρ_{fsup} et inférieure ρ_{finf} :

$$f_d(j,\Omega_s \rightarrow \Omega_v,\Omega_f) = \begin{cases} \frac{1}{\pi}.\rho_f(\Psi_{fs}).|\Omega_f.\Omega_v| & (\Omega_s.\Omega_f).(\Omega_f.\Omega_v) < 0 \\ \frac{1}{\pi}.\tau_f(\Psi_{fs}).|\Omega_f.\Omega_v| & (\Omega_s.\Omega_f).(\Omega_f.\Omega_v) > 0 \end{cases} \quad \text{(I-60)}$$

$$\text{où} \quad \int_{4\pi} f_d(j,\Omega_s \rightarrow \Omega_v,\Omega_f).d\Omega_v = \rho_f(\Psi_{fs}) + \tau_f(\Psi_{fs}) \quad \text{(I-61)}$$

$f_s(j,\Omega_s \rightarrow \Omega_v,\Omega_f)$ représente la portion de rayonnement réfléchi de manière spéculaire et $f_p(j,\Omega_s \rightarrow \Omega_v,\Omega_f)$ le rayonnement réfléchi polarisé. $f_s(j,\Omega_s \rightarrow \Omega_v,\Omega_f)$ dépend de 3 paramètres (Vanderbilt *et al.,* 1991):

- l'angle (Ψ_{sv}) entre la direction incidente (Ω_s) et la normale foliaire (Ω_f),
- les indices de réfraction des faces foliaires supérieure et inférieure (*e.g.*, $n_{inf} \approx n_{sup} \approx 1.5$),
- 2 facteurs correctifs K_{finf} et K_{fsup} (de 0 pour surface lisse à 1 pour surface rugueuse). Ces derniers peuvent être constants ou varier avec (Ψ_{fs}) : $K_{finf}(j, \Psi_{fs}) = \kappa_j.\tan(\Psi_{fs})$.

$$f_s(j,\Omega_s \rightarrow \Omega_v,\Omega_s) = K_f(j,\Psi_{fs}).R_s^2(n_j,\Psi_{fs}).\delta(\Omega_s,\Omega_v^*) \quad \text{(I-62)}$$

où $\delta(\Omega_s, \Omega_v^*)$ est une fonction de Dirac *i.e.* $\delta(\Omega_s, \Omega_v^*) = 0$ si Ω_v diffère de la direction spéculaire Ω_v^*. Le terme $R_s^2(n_j,\Psi_{fs})$ est le carré du coefficient de réflectance spéculaire moyen de Fresnel.

De même, la fraction de rayonnement polarisé est dérivée des équations de Fresnel $R_p^2(n_j,\Psi_{fs})$:

$$f_p(j,\Omega_s \rightarrow \Omega_v,\Omega_s) = K_f(j,\Psi_{fs}).R_p^2(n_j,\Psi_{fs}).\delta(\Omega_s,\Omega_v^*) \quad \text{(I-63)}$$

A partir de l'intégration discrète (sur des angles solides discrets) des trois fonctions de phase ci-dessus, le module *Phase* calcule pour chaque espèce foliaire *j*, les 3 fonctions de transfert T_d, T_s et T_p. Ainsi, l'interception de l'énergie $W_{int}(\Delta l_i\ \Omega_s)$ donne selon $(\Omega_v,\Delta\Omega_v)$:

- Flux diffus : $\mathcal{W}(\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v) = W_{int}(\Delta l_i\ \Omega_s).T_d(j,\Omega_s,\Omega_v)$ (I-64)

  où la fonction de transfert diffuse est : $T_d(j,\Omega_s,\Omega_v) = \int_{\Delta\Omega_v} \frac{P(j,\Omega_s,\Omega_v)}{4\pi}.d\Omega_v \approx \frac{P(j,\Omega_s,\Omega_v)}{4\pi}.\Delta\Omega_v$

- Flux spéculaire : $\mathcal{W}_s(\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v) = W_{int}(\Delta l_i\ \Omega_s).T_s(j,\Omega_s,\Omega_v)$ (I-65)

  où la fonction de transfert spéculaire est $T_s(j,\Omega_s,\Omega_v) = \frac{\int_{2\pi} \frac{g_f(j,\Omega_f^*)}{2\pi}.|\Omega_s.\Omega_f^*|.K_f(j,\Psi_{fs}).R_s^2(n_j,\Psi_{fs})}{G(j,\Omega_s)}.\Delta\Omega_f^*$

  et Ω_f^* est la normale foliaire qui donne la réflexion spéculaire et $\Delta\Omega_f^*$ l'angle solide associé.

◆ Flux polarisé : $\mathcal{W}_p(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v) = W_{int}(\Delta l_i\ \Omega_s).T_p(j,\Omega_s,\Omega_v)$ (I-66)

où la fonction de transfert polarisée est $T_p(j,\Omega_s,\Omega_v) = \dfrac{\int \frac{g_f(j,\Omega_f^*)}{2\pi}.|\Omega_s.\Omega_f^*|.K_f(j,\Psi_{fs}).R_p^2(n_j,\Psi_{fs})}{G(j,\Omega_s)}.\Delta\Omega_f^*$ avec 2π

I.4.3 Diffusion d'une cellule turbide

● Diffusion d'ordre 1 (k=1)

Soit le vecteur source $[W(l,\Omega_s), W_{nf}(l,\Omega_s), W_p(l,\Omega_s)]$ incident selon (Ω_s) en (A) sur la face *f* de la cellule turbide *i*, avec une seule espèce foliaire *j* (*Figure I.28*). Tout point sur le trajet Δl_i du rayon dans la cellule est repéré par $l\in[0\ \Delta l_i]$, depuis (A). Ici : f=2. On note : $nf_{in}(\Omega_s)=\dfrac{W_{nf}(0,\Omega_s)}{W(0,\Omega_s)}$, avec $nf_{in}(\Omega_s)=1$ pour k=1.

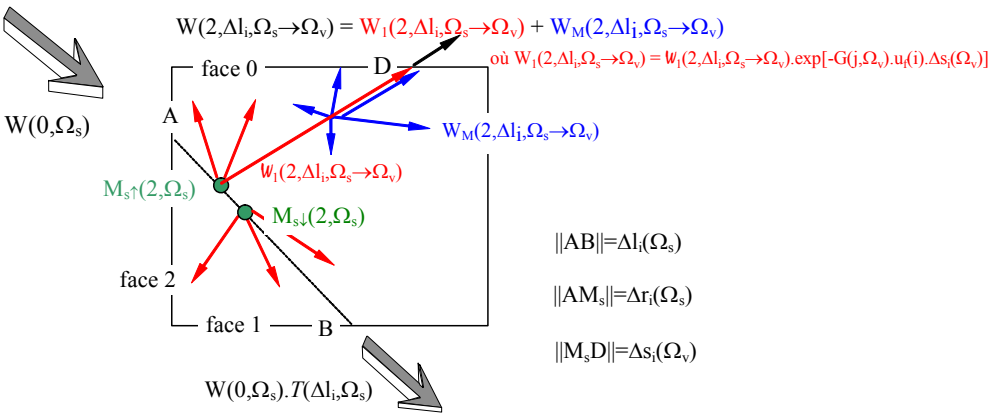


Figure I.28: Mécanismes de diffusion simple et multiple au sein d'une cellule turbide.

La propagation de $W(l,\Omega_s)$ dans la cellule, incident sur la face *f*, donne l'interception $W_{int}(f,\Omega_s)$. Ce rayonnement intercepté engendre une diffusion qui est modélisée à partir de 2 points origine appelés "points milieux" (M_s), situés sur le trajet Δl_i : $M_{s\uparrow}$ et $M_{s\downarrow}$ respectivement pour les directions de diffusion montantes et descendantes. La position de ces points est calculée de manière à assurer une précision maximale (Gastellu-Etchegorry *et al.*, 2004) pour la simulation des flux d'ordre 1 que la cellule diffuse vers le haut et le bas, après atténuation le long des trajets $\Delta s_i(\Omega_v)$ dans cette cellule. On a :

$$\mathcal{W}_1(f,\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v) = T(j,\Omega_s,\Omega_v).W_{int}(f,\Omega_s) = \mathcal{W}_{d1}(f,\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v) + \mathcal{W}_{s1}(f,\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v) \quad \text{(I-67)}$$

où $\mathcal{W}_{d1}(f,\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v) = T_d(j,\Omega_s,\Omega_v).W_{int}(f,\Omega_s)$ $\mathcal{W}_{s1}(f,\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v) = T_s(j,\Omega_s,\Omega_v).W_{int}(f,\Omega_s)$

$T(j,\Omega_s,\Omega_v) = [T_d(j,\Omega_s,\Omega_v) + T_s(j,\Omega_s,\Omega_v)]$

La diffusion d'ordre 1 totale est :

$$W_1(f,\Omega_s) = \int_{4\pi}\mathcal{W}_1(f,\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v) = \sum_{v=1}^{N_{dir}}[\mathcal{W}_{d1}(f,\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v) + \mathcal{W}_{s1}(f,\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)] \quad \text{(I-68)}$$

Le flux qui sort de la cellule est le flux $\mathcal{W}_1(f,\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$ après atténuation le long du trajet de sortie :

$$W_1(f,\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v) = \mathcal{W}_1(f,\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v).\exp[-G(j,\Omega_v).u_f(i).\Delta s_i(\Omega_v)] \quad \text{(I-69)}$$

avec $\Delta s_i(\Omega_v)$ pré calculé pour une grille de points qui sur échantillonne la grille dite des sous cellules.

Le flux d'ordre 1 qui quitte la cellule est : $[W_1(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v),\ W_{nf,1}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v),\ W_{p,1}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)]$

où $\quad nf_1(\Omega_s,\Omega_v)=\dfrac{W_{nf,1}(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)}{W_1(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)}=s_1(j,\Omega_s,\Omega_v).nf_{in}(\Omega_s)$ $\qquad s_1(j,\Omega_s,\Omega_v)=\dfrac{T_s(j,\Omega_s,\Omega_v)}{T(j,\Omega_s,\Omega_v)}$

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

L'atténuation du flux d'ordre 1 $\mathcal{W}_1(f,\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$ tient compte du phénomène du hot spot.

- **Hot spot (k=1)**

La réflectance de tout milieu (*e.g.* végétation, forêt, sol), même homogène (*e.g.* culture simulée par un milieu turbide), illuminé par un rayonnement directionnel de longueur d'onde (λ) très inférieure à la taille des diffuseurs, tend à être maximale autour de la direction de rétro-illumination (Myneni *et al.*, 1991), aussi appelée configuration du *hot spot*. La raison essentielle est que les diffuseurs (*i.e.* feuilles pour la végétation) masquent leurs propres ombres (shadow-hiding) pour un angle de phase nul (g=0). Ce maximum est plutôt du à la rétrodiffusion cohérente si les diffuseurs du milieu ont des dimensions proches de λ (Hapke *et al.*, 1996), car avec g=0, les fronts d'ondes réfléchis par le milieu se combinent de manière constructive. En fait, des observations in situ et spatiales (Bréon *et al.*, 2002) de différents biomes font surtout apparaître le *hot spot* du au phénomène d'ombres masquées.

Dans DART, le *hot spot* est modélisé en adaptant l'approche de Kuusk (1991) pour tenir compte du fait que les cellules ne sont pas des couches planes infinies. Dans un milieu turbide homogène, le *hot spot* est du au fait que les mécanismes d'interaction qui surviennent le long de la direction de diffusion (Ω_v) sont plus ou moins corrélés avec ceux qui surviennent le long de la direction incidente (Ω_s). Cette corrélation dépend de la distance horizontale $z.\Delta(\Omega_s,\Omega_v)$ entre Ω_s et Ω_v ainsi que de la taille apparente des feuilles s_f. Par suite, dans une cellule turbide i de fonction de phase foliaire j, le coefficient d'extinction du flux diffusé d'ordre 1 $W_1(\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$ depuis le point milieu (M_s) n'est pas $u_f(i).G(j,\Omega_v)$ mais :

$$\alpha_e(\Omega_s,\Omega_v,\delta s_i)=u_f(i).G(j,\Omega_v).\{1-\sqrt{\frac{G(j,\Omega_s).}{G(j,\Omega_v).|\mu_s|.\mu_v}}.\frac{s_f(j,\Omega_v)}{\Delta(\Omega_s,\Omega_v)}.[1-\exp(-\frac{\Delta(\Omega_s,\Omega_v)}{s_f}.\delta s_i(\Omega_v).\mu_v)]\} \qquad \text{(I-70)}$$

$$\text{où :}\quad \Delta(\Omega_s,\Omega_v)=\sqrt{\frac{1}{\mu_v^2}+\frac{1}{\mu_s^2}-\frac{2.\cos g}{|\mu_s.\mu_v|}} \qquad \text{et } \cos g=-\vec{\Omega}_s.\vec{\Omega}_v\ (\theta_s\in\ ]\frac{\pi}{2};\pi]) \qquad \text{(I-71)}$$

Pour une distribution aléatoire de feuilles circulaires (Kuusk, 1991) :

$$s_f(j,\Omega_v)=\frac{\pi.d_f(j).G(j,\Omega_v)}{4.\mu_v.IIs_f(j,\Omega_f)} \qquad \text{avec}\quad IIs_f(j,\Omega_f)=\int_{2\pi}\int_{\frac{\pi}{2}}\frac{g_f^*(j,\Omega_f)}{2\pi}\frac{d\theta_f.d\phi_f}{\sqrt{1+tg^2\theta_f.\sin^2\phi_f}} \qquad \text{(I-72)}$$

où d_f est le diamètre des feuilles et $\dfrac{G(j,\Omega_v)}{\mu_v}$ la fraction de surface foliaire d'interception efficace normalisée selon la direction de visée Ω_v. En supposant les feuilles horizontales et un rôle symétrique

des directions Ω_s et Ω_v, Kuusk (1991) suggère que le niveau de corrélation au niveau z varie en $e^{-\Delta(\Omega_s,\Omega_v).z/s_f}$ où s_f a un impact supérieur à la forme de la fonction de corrélation. Par contre, pour Bréon *et al.* (2002) la forme du *hot spot* d'un couvert homogène sphérique semble mieux décrite par l'angle de phase que par la fonction $\Delta(\Omega_s,\Omega_v)$. De plus, hormis le cas "LAD horizontal", la distance "Ω_s - Ω_v" leur paraît devoir être calculée perpendiculairement à Ω_s et Ω_v, indépendamment de s_f, alors que Kuusk (1991) a introduit s_f pour se ramener à une distribution horizontale ($s_f(_{horiz.},\Omega_v \approx \Omega_s) = d_f(j).\pi/4$). Le Tableau I.5 donne $IIs_f^{trigo.}(j,\Omega_f)$, déduit de $g_f^{trigo.}(j,\theta_f)$, pour le LAD sphérique et les 5 LADs de DeWit (1965).

LAD	*planophile*	*érectophile*	*plagiophile*	*extrémophile*	*uniforme*	*sphérique*
$IIs_f^{trigo.}(j,\Omega_f)$	5.7242	3.6057	5.0368	4.2932	4.665	4

Tableau I.5: Pré calcul de la double intégrale pour les 6 LAD prédéfinis.

Pour la distribution ellipsoïdale (Campbell, 1990), l'approche d'Andrieu *et al.* (1997) est retenue, c'est à dire une expression symétrique pour la taille apparente des feuilles : $s_f(j,\Omega_s,\Omega_v) = \sqrt{s_f(j,\Omega_s).s_f(j,\Omega_v)}$. Afin de diminuer les temps de calcul, $IIs_f^{ellipsoidal}(j,\Omega_f)$ est approchée (avec *ALA* exprimé en degrés) par :

$$\left(IIs_f^{ellipsoidal}(j,\Omega_f)\right)^{-1} \approx 1+0.357\left(\frac{ALA(j)}{97-ALA(j)}\right)^{1.252} \qquad \text{(I-73)}$$

Cette expression approche très bien la valeur théorique sur un intervalle de θ_f compris entre 0 et 85°. Elle n'est pas valable pour la distribution elliptique. Par suite, le module *Dart* pré calcule la double intégrale de la distribution elliptique avec la fonction normalisée des normales foliaires $\frac{g_f^{elliptical}(j,\Omega_f)}{2\pi}$.

- **Diffusion multiple (k=1)**

L'interception de $\mathcal{W}_1(f,\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v)$ sur les N_{dir} trajets $\Delta s_i(\Omega_v)$ génère des diffusions multiples au sein de la cellule. Celles-ci sont modélisées sans tenir compte des mécanismes de polarisation. Elles reposent sur le calcul de l'énergie totale interceptée $\mathcal{W}_{1,int}(f,\Delta l_i,\Omega_s)$ sur toutes les N_{dir} directions de diffusion :

$$\mathcal{W}_{1,int}(f,\Delta l_i,\Omega_s) = \sum_{v=1}^{N_{dir}} \{[\mathcal{W}_{d1}(f,\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v) - W_{d1}(f,\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v)] + [\mathcal{W}_{s1}(f,\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v) - W_{s1}(f,\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v)]\} \qquad \text{(I-74)}$$

$\mathcal{W}_{1,int}(f,\Delta l_i,\Omega_s)$ est ensuite diffusé pour tout ou partie. Cette diffusion ne peut être modélisée de manière exacte. Pour cela, il est supposé que la diffusion volumique est isotrope. Ceci permet de calculer la puissance totale qui quitte la cellule, associée aux diffusions multiples, comme la série géométrique :

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

$$\Rightarrow\ W_M(f,\Delta l_i,\Omega_s) \approx \left[\frac{\omega_j.<T_i>}{1 - \omega_j.[1 - <T_i>]}\right].\mathcal{W}_{1,int}(f,\Delta l_i,\Omega_s) \qquad \text{(I-75)}$$

Les éléments foliaires d'espèce *j* de la cellule *i* étant caractérisés par un modèle bi-lambertien et un modèle spéculaire, l'albédo de simple diffusion ω_j est la somme d'un albédo "diffus" ω_{dj} et d'un albédo "spéculaire" ω_{sj}. La composante spéculaire "pure" est :

$$W_{sM}(f,\Delta l_i,\Omega_s) \approx [\frac{\omega_{sj}.<T_i>}{1 - \omega_{sj}.[1 - <T_i>]}].\mathcal{W}_{1,int}(f,\Delta l_i,\Omega_s) \quad \text{(I-76)}$$

La composante diffuse inclue tout ce qui n'est pas purement spéculaire :

$$W_{dM}(f,\Delta l_i,\Omega_s) = W_M(f,\Delta l_i,\Omega_s) - W_{sM}(f,\Delta l_i,\Omega_s) \approx \{\frac{\omega_j.<T_i>}{1 - \omega_j.[1 - <T_i>]} - \frac{\omega_{sj}.<T_i>}{1 - \omega_{sj}.[1 - <T_i>]}\}.\mathcal{W}_{1,int}(f,\Delta l_i,\Omega_s) \quad \text{(I-77)}$$

Le coefficient de transmission moyen $<T_i>$ est la moyenne des facteurs de transmission sur tous les trajets $\Delta m_i(\Omega)$, trajets entre le centre et les faces de la cellule *i* :

$$<T_i> = \int_{4\pi} e^{-G(j,\Omega).uf(i).\Delta mi(\Omega)} = \frac{1}{4\pi} \sum_{v=1}^{N_{dir}} [T(j,\Omega_v)]^{uf(i).\Delta mi(\Omega v)}.\Delta\Omega_v \quad \text{(I-78)}$$

La puissance totale diffusée $W_M(f,\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v)$, associée au rayonnement intercepté par la face *f*, qui sort de la cellule selon Ω_v, est supposée être proportionnelle à $W_M(f,\Delta l_i,\Omega_s)$, au facteur de transmission selon $\Delta s_i(\Omega_v)$ et à la somme des coefficients de diffusion différentiel depuis toute direction vers Ω_v :

$$W_M(f,\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v) = W_M(f,\Delta l_i,\Omega_s).\frac{T(\Delta s_i,\Omega_v).\sum_{s=1}^{N_{dir}} \int_{2\pi} |\Omega_s.\Omega_f|.\frac{g_f(j,\Omega_f)}{2\pi}.f(j,\Omega_s \rightarrow \Omega_v,\Omega_f).d\Omega_f.\Delta\Omega_s.\Delta\Omega_v}{\sum_{v=1}^{N_{dir}} T(\Delta s_i,\Omega_v).\sum_{s=1}^{N_{dir}} \int_{2\pi} |\Omega_s.\Omega_f|.\frac{g_f(j,\Omega_f)}{2\pi}.f(j,\Omega_s \rightarrow \Omega_v,\Omega_f).d\Omega_f.\Delta\Omega_s.\Delta\Omega_v} \quad \text{(I-79)}$$

Les expressions "$G(j,\Omega_s) = -\ln[T(j,\Omega_s)]$" et "$TG(j,\Omega_v) = \sum_{s=1}^{N_{dir}} T(j,\Omega_s,\Omega_v).\ln[T(j,\Omega_s)].\Delta\Omega_s$" conduisent à :

$$W_M(f,\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v) = W_M(f,\Delta l_i,\Omega_s).\frac{T(\Delta s_i,\Omega_v).TG(j,\Omega_v)}{\sum_{v=1}^{N_{dir}} T(\Delta s_i,\Omega_v).TG(j,\Omega_v)] } \approx W_M(f,\Delta l_i,\Omega_s).\frac{T(\Delta s_i,\Omega_v).TG(j,\Omega_v)}{<T_i>.\sum_{v=1}^{N_{dir}} TG(j,\Omega_v)] } \quad \text{(I-80)}$$

$$\Rightarrow \quad W_{sM}(f,\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v) = \frac{T(\Delta s_i,\Omega_v)}{<T_i>}.s_M(j,\Omega_v).W_{sM}(f,\Delta l_i,\Omega_s) \quad \text{(I-81)}$$

$$\Rightarrow \quad W_{nf,M}(f,\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v) = nf_{in}(\Omega_s).\frac{\omega_{sj}}{\omega_j}.\frac{T(\Delta s_i,\Omega_v)}{<T_i>}.s_M(j,\Omega_v).W_{sM}(f,\Delta l_i,\Omega_s) \quad \text{(I-82)}$$

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

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

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

Tous les termes (*i.e.* ω_{dj}, ω_{sj}, $TG(j,\Omega_v)$, $s_M(j,\Omega_v)$,...) ont été pré-calculés par le module *Phase*, car ils ne dépendent que des espèces foliaires et des directions discrètes.

Durant la phase d'illumination solaire directe, une face *f* de cellule peut être éclairée par $\vartheta(f)$ vecteurs sources se propageant selon la même direction (Ω_s). Par suite, la puissance diffusée, associée à la face *f*, qui sort de la cellule *i*, suivant la direction (Ω_v), est :

$$[\sum_{o=1}^{\vartheta(f)}\{W_1(f,\Delta l_i(o),\Omega_s\rightarrow\Omega_v)+W_M(f,\Delta l_i(o),\Omega_s\rightarrow\Omega_v)\},\ W_{nf}(f,\Omega_s\rightarrow\Omega_v),\ W_p(f,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)] \qquad \text{(I-83)}$$

où $W_{nf}(f,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)=\sum_{o=1}^{\vartheta(f)}W_{nf}(f,\Delta l_i(o),\Omega_s\rightarrow\Omega_v)=\sum_{o=1}^{\vartheta(f)}nf(f,\Delta l_i(o),\Omega_s,\Omega_v).W_{scat}(f,\Delta l_i(o),\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$

$$W_p(f,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)=\sum_{o=1}^{\vartheta(f)}W_p(f,\Delta l_i(o),\Omega_s\rightarrow\Omega_v)=\sum_{o=1}^{\vartheta(f)}p(f,\Delta l_i(o),\Omega_s,\Omega_v).W_{scat}(f,\Delta l_i(o),\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$$

Chaque flux intercepté $W_{int}(f,\Delta l_i(o),\Omega_s)$, et les points $\{M_s\uparrow(f,\Delta l_i(o),\Omega_s), M_s\downarrow(f,\Delta l_i(o),\Omega_s)\}$ associés, ont été stockés au cours de cette phase d'illumination.

Le vecteur source total qui sort de la cellule i selon (Ω_v) est :

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

- **Diffusion (k>1)**

La modélisation utilisée aux itérations k > 1 diffère de celle utilisée à l'itération 1. Ainsi, la polarisation est négligée. Par suite, la diffusion selon Ω_v d'un flux incident selon Ω_n donne :

$$[W_{scat}(f,\Omega_n\rightarrow\Omega_v),\ W_{nf}(f,\Omega_n\rightarrow\Omega_v),\ 0] \qquad \text{où } W_{scat}(f,\Omega_n\rightarrow\Omega_v)=W_1(f,\Omega_n\rightarrow\Omega_v)+W_M(f,\Omega_n\rightarrow\Omega_v)$$

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

En fait, toute face de cellule est éclairée par un nombre $\vartheta(f)$ de vecteurs sources $W_{in}(\Omega_{n(o)})$ avec diverses directions incidentes $\Omega_{n(o)}$ dans l'espace 4π, avec $o\in[1\ \ \vartheta(f)]$ et $n\in[1\ \ N]$. La distribution angulaire des flux interceptés affecte la valeur des flux diffusés avec un impact qui dépend du milieu (LAD sphérique, structure du paysage, *etc.*). Ceci permet d'ajuster la précision du calcul des diffusions. Ainsi, le module *Dart* mémorise avec une précision "réglable" la distribution angulaire des rayons incidents interceptés en stockant l'énergie interceptée par secteur angulaire $\Omega_{sect,r}$ (Gastellu-Etchegorry *et al.*, 2004) :

$$W_{int}(f,\Omega_{sect,r})=\Sigma_{\Omega_s}W_{int}(f,\Omega_s) \qquad r\in[1\ N_{sect}] \qquad \text{(I-84)}$$

où toutes les directions (Ω_s) proviennent du secteur ($\Omega_{sect,r}$) de largeur angulaire ($\Delta\Omega_{sect,r}$).

Par défaut, N_{sect} = 6 mais peut varier en respectant la condition $N_{sect} \le N_{dir}$. Il s'agit en effet, de réaliser un compromis entre "contrainte mémoire/temps de calcul" et précision du modèle. L'emploi des secteurs augmente la dimension de certaines variables (*e.g.*, $nf(f,\Omega_{sect,r})$).

Le flux total diffusé d'ordre 1 selon (Ω_v) au point $M_s(f)$ est :

$$\mathcal{W}_1(f,\Omega_v)=\sum_{r=1}^{N_{sect}}[T(\Omega_{sect,r}\rightarrow\Omega_v).\sum_{n(o)\in\Delta\Omega sect,r}W_{int}(f,\Omega_{n(o)})] \text{ où } T(\Omega_{sect,r}\rightarrow\Omega_v)=\frac{\sum_{n(o)\in\Delta\Omega sect,r}T(\Omega_{n(o)},\Omega_v)}{\sum_{n(o)\in\Delta\Omega sect,r}\Delta\Omega_{n(o)}} \qquad \text{(I-85)}$$

Comme à l'itération 1, $\mathcal{W}_1(f,\Omega_v)$ est atténué quand il traverse la cellule, si bien que le flux qui quitte la cellule est $W_1(f,\Omega_v)$. De même, l'interception de tous les $\mathcal{W}_1(f,\Omega_v)$ dans la cellule induit des diffusions multiples représentées par $W_M(f,\Omega_v)$. Pour chaque face f, le flux qui sort de la cellule est donc :

$$[W_l(f,\Omega_v) + W_M(f,\Omega_v),\ W_{nf}(f,\Omega_v),\ 0] = [\sum_{r=1}^{N_{sect}} W_{scatt}(f,\Omega_{sect,r}\rightarrow\Omega_v),\ \sum_{r=1}^{N_{sect}} W_{nf}(f,\Omega_{sect,r}\rightarrow\Omega_v),\ 0]$$

Le calcul de $W_M(f,\Omega_v)$ et l'atténuation de $\mathcal{W}_l(f,\Omega_v)$ font que ce n'est pas une simple somme sur les secteurs.

- **Point milieu (k>1)**

De manière à réduire la contrainte mémoire due aux scènes qui incluent beaucoup de cellules turbides, seuls le point milieu moyen et l'énergie interceptée associée sont stockés, et non tous les points milieux $M_s(f,\Omega_{n(o)})$ et les énergies interceptées associées. Le point milieu moyen est un barycentre énergétique calculé séquentiellement au fur et à mesure des interactions des rayons avec la cellule. Considérons une cellule au cours de l'itération (k). L'interception de o rayons incidents sur la face f, provenant de l'espace 4π, donne l'énergie interceptée $W_{int}(f,o,k)$ et le point milieu moyen $M_{s\uparrow}(f,o,k)$ pour les directions de diffusion montantes. Ses coordonnées sont $(x_{f,o,k},y_{f,o,k},z_{f,o,k})$. L'interception par la face f de la cellule d'un $(o+1)^{ème}$ rayon lors de l'itération (k) induit l'interception $W_{int}(f)$ et un point milieu $M_{s\uparrow}(x,y,z)$, ce qui donne un nouveau $W_{int}(f,o+1,k)$ et $M_{s\uparrow}(f,o+1,k)$ de coordonnées $(x_{f,o+1,k},y_{f,o+1,k},z_{f,o+1,k})$:

$$W_{int}(f,o+1,k) = W_{int}(f,o,k) + W_{int}(f)$$

$$x_{f,o+1,k} = \frac{x_{f,o,k}.W_{int}(f,o,k) + x.W_{int}(f)}{W_{int}(f,o,k) + W_{int}(f)},\quad y_{f,o+1,k} = \frac{y_{f,o,k}.W_{int}(f,o,k) + y.W_{int}(f)}{W_{int}(f,o,k) + W_{int}(f)},\quad z_{f,o+1,k} = \frac{z_{f,o,k}.W_{int}(f,o,k) + z.W_{int}(f)}{W_{int}(f,o,k) + W_{int}(f)} \qquad \text{(I-86)}$$

- **Trajet du flux diffusé hors de la cellule diffusante** (*Figure I.30*).

Ceci est illustré ici pour un flux diffusé vers le haut.

Iteration 1

$W_{scatt}(f,\Omega_s\rightarrow\Omega_v) = \sum_{o=1}^{\vartheta(f)} \{W_l(f,\Delta l_i(o),\Omega_s\rightarrow\Omega_v) + W_M(f,\Delta l_i(o),\Omega_s\rightarrow\Omega_v)\}$ est le flux montant qui sort de la cellule, depuis $M_s\uparrow(f)$. A partir du plan $\mathcal{P}$, le trajet du flux a pour origine le centre $\mathcal{D}_{sf,h}$ de la sous face qui contient $D_{f,h}$. La diffusion d'une cellule selon une direction donnée (Ω_v) est donc simulée par le suivi de 3 flux au plus (le flux solaire direct intersecte 3 faces au plus).

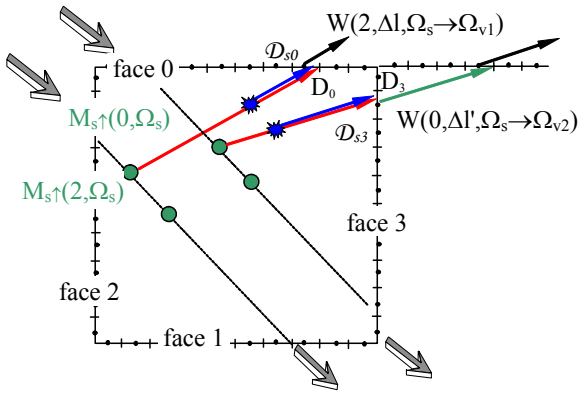


Figure I.29:

Schéma illustratif de trajets de flux diffusés à l'itération 1.

Iteration >1

Après que tous les flux $W_{scatt}(f,\Omega_v)$, atténués ou non après sa sortie de la cellule, aient atteint le plan ($\mathcal{P}$), le barycentre énergétique D_{bar} des points D_f est calculé. Au delà, le rayon est suivi depuis le centre $\mathcal{D}_{sf}$ de la sous-face, appartenant au plan ($\mathcal{P}$), le plus proche du point $\mathcal{D}_{bar}$. Son intensité est la somme des 6 vecteurs sources au plus qui atteignent le plan ($\mathcal{P}$) :

$$W_{scatt}(\Omega_v) = \sum_{f=1}^{6} \Sigma_r W_1^*(f,\Omega_{sect,r}\rightarrow\Omega_v) + \sum_{f=1}^{6} \Sigma_r W_M^*(f,\Omega_{sect,r}\rightarrow\Omega_v) \qquad \text{(I-87)}$$

où l'astérisque * indique que le vecteur source peut avoir été atténué par les cellules voisines.

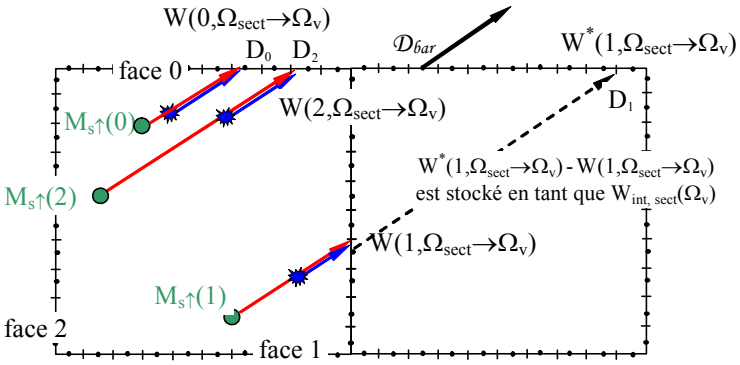


Figure I.30:

Schéma illustratif de trajets de flux diffusés aux itérations k>1.

I.4.4 Diffusion d'une cellule mixte

Une cellule mixte peut contenir :

- N_{surf} différentes surfaces opaques représentées par leurs propriétés $\{\rho_{surf,u}[\Omega_s,\Omega_v)],...\}$et géométriques $M_{s,surf,u}$ (*i.e.* barycentre énergétique) où u ∈ [1 N_{surf}] ;
- N_{turb} différents milieux turbides $\{g_t(\Omega_f), u_{f,t}, \rho_{ft}, \tau_{f,t},...\}$ où t ∈ [1 N_{turb}]. Le comportement radiatif de ces N_{turb} milieux est simulé comme celui d'un milieu turbide dont les paramètres "moyens" sont :
  - Une densité volumique $u_f=\Sigma_t u_{f,t}$ et un facteur géométrique $G(\Omega)=\dfrac{\Sigma_t G_t(\Omega).u_{f,t}}{u_f}$ (I-88)
  - Une fonction de phase : $T(\Omega_s,\Omega_v)=\dfrac{\Sigma_t u_{f,t}(i).T_t(\Omega_s,\Omega_v)}{\Sigma_t u_{f,t}(i)}$ (I-89)
  - Une surface apparente des feuilles (I-72) : $s_f(\Omega)=\dfrac{\Sigma_t s_{f,t}(\Omega).G_t(\Omega).u_{f,t}}{\Sigma_t G_t(\Omega).u_{f,t}}$ (I-90)
  - Une altitude des barycentres $z_{Ms}\uparrow$ et ($z_{Ms}\downarrow$) calculées pour $\theta_s\neq\theta_v$ avec :

$$z_{Ms\,(\downarrow)}^{\uparrow}(\Omega_v) = -\frac{|\mu_v|}{{}_{(+)}G(\Omega_v).u_f}\cdot\ln\left[\frac{\frac{G(\Omega_s).|\mu_v|}{{}_{(-)}G(\Omega_v).|\mu_s| + G(\Omega_s).|\mu_v|}\cdot\left[1-\exp\left[-u_f.\Delta z.\left(\frac{G(\Omega_v)}{|\mu_v|}\underset{(-)}{+}\frac{G(\Omega_s)}{|\mu_s|}\right)\right]\right]}{\left[1-\exp\left[-G(\Omega_s).u_f.\frac{\Delta z}{|\mu_s|}\right]\right]}\right] \qquad \text{(I-91)}$$

Pour la direction solaire ($\theta_s=\theta_v$) : $z_{Ms}(\Omega_v) = \dfrac{|\mu_s|}{G(\Omega_s).u_f}.\ln\left[\dfrac{G(\Omega_s).u_f.\frac{\Delta z}{|\mu_s|}}{\left[1-\exp\left[-G(\Omega_s).u_f.\frac{\Delta z}{|\mu_s|}\right]\right]}\right]$ (I-92)

L'interaction entre un rayon et une cellule mixte est modélisée en considérant les 2 seuls cas possibles (Figure I.32 et Figure I.31) : le rayon incident sur la face *f* de la cellule traverse celle-ci en interceptant ou non une surface opaque. Le Tableau I.6 présente les algorithmes associés.

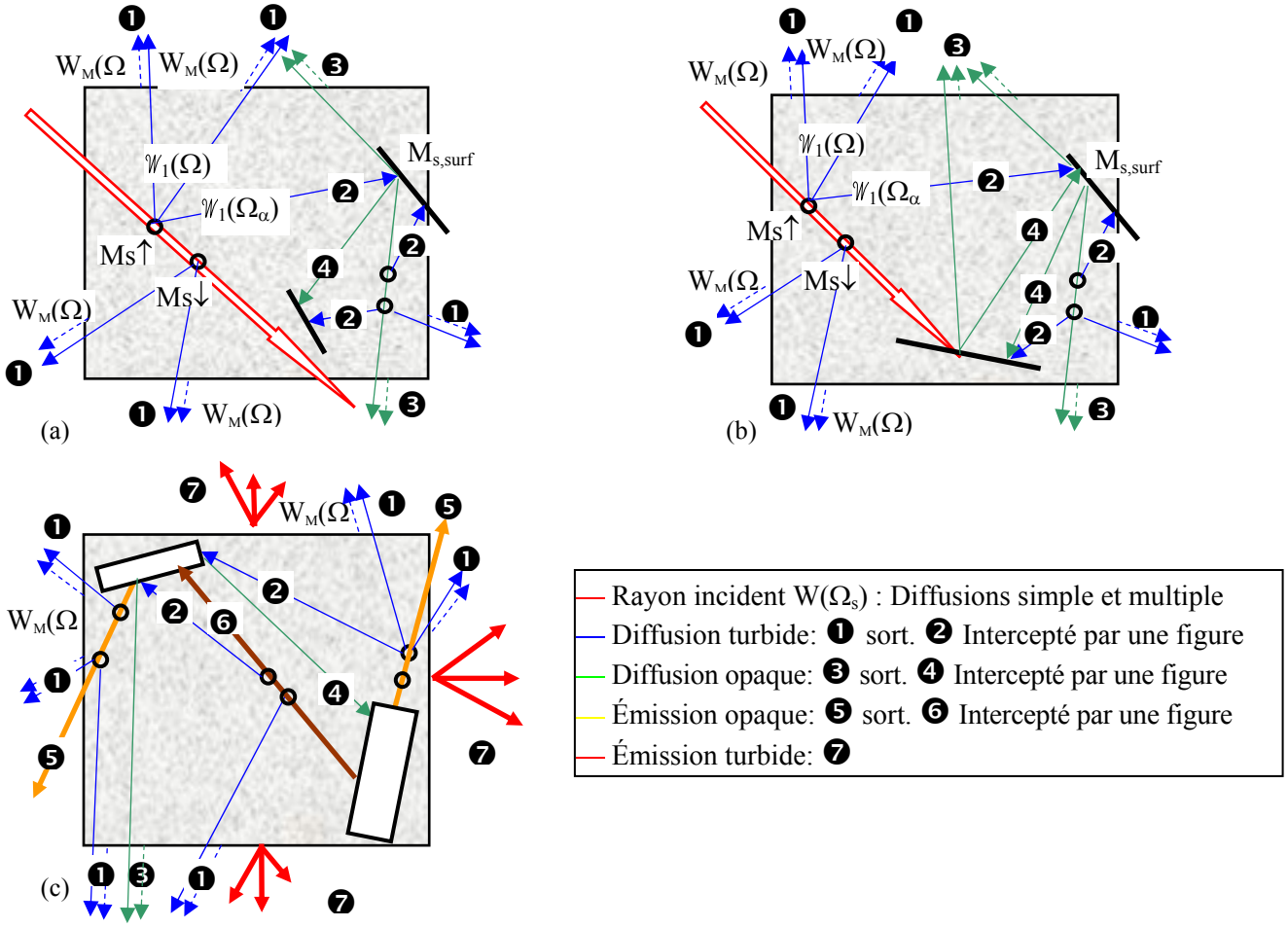


Figure I.31 : Transfert radiatif dans une cellule mixte. Un rayon incident traverse la cellule sans (a) et avec (b) interception par une surface opaque (mode R ou itération k≠2 en mode T). c) Itération k=2 en mode (T).

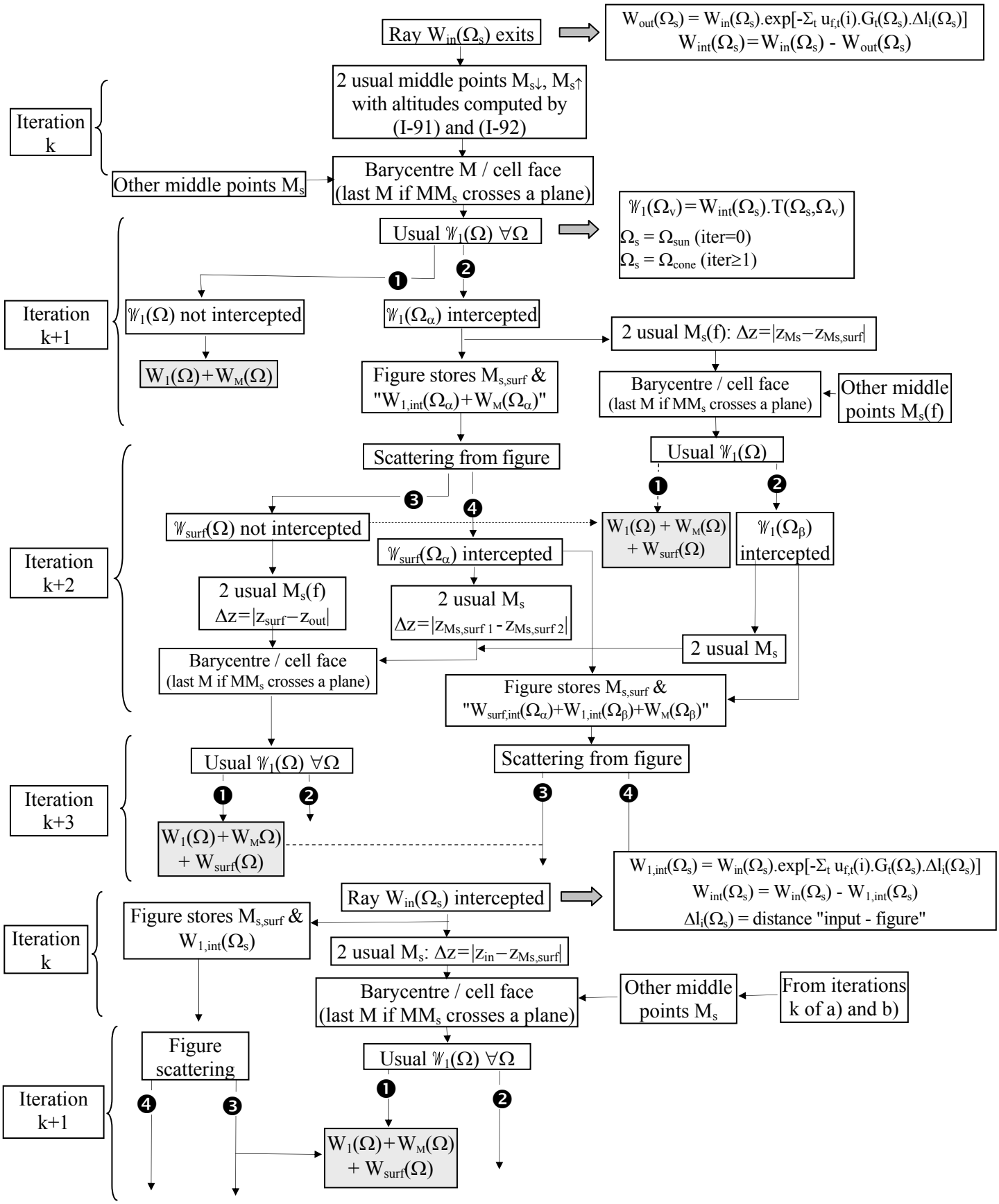


Figure I.32 : Transfert radiatif dans une cellule mixte (turbide + opaque) en mode (R).

1) ***Un rayon traverse la cellule sans être intercepté par une surface opaque*** (Figure I.31.a)

- **Itération k** : Calcul de $M_s\uparrow(f)$ et $M_s\downarrow(f)$ le long de Δl par face f. Dès qu'un rayon intersecte la cellule la méthode barycentrique fait passer de $M_{s,old}(f)$ à $M_{s,new}(f)$. Si le segment $[M_{s,old}(f); M_{s,new}(f)]$ intersecte une figure, alors le nouveau barycentre reste $M_{s,old}(f)$.

- **Itération k+1** : Si $\mathcal{W}_1(\Omega)$ sort de la cellule

  ❶ *Sans interception* : $W_1(\Omega) + W_M(\Omega)$ quitte la cellule.

  ❷ *Avec interception* : $W_{1,int}(\Omega) + W_M(\Omega)$ intercepté par la surface. Calcul de nouveaux $M_s\uparrow$(f) et $M_s\downarrow$(f) en remplaçant dans (I-90) et (I-91) Δz par $|z_{Ms}(f) - z_{Ms,surf}|$. En l'absence de surface interceptrice f est la face de sortie de la cellule qu'emprunte le rayon. Puis calcul des nouveaux barycentres.

- **Itération k+2** :

  a) *Diffusion de la surface* : Si $\mathcal{W}_{surf}(\Omega)$ quitte la cellule

  ❸ *Sans interception* : - Calcul de $M_s\uparrow$(f) et $M_s\downarrow$(f) avec (I-90) et (I-91) et $\Delta z=|z_{Ms,surf}-z_{out}|$ où z_{out} =altitude de sortie du rayon, puis calcul des nouveaux barycentres.
  - $W_{surf}(\Omega)$ quitte la cellule.

  ❹ *Avec interception* : $W_{surf,int}(\Omega)$ et $W_1(\Omega) + W_M(\Omega)$ (issus des $M_s\uparrow$ et $M_s\downarrow$) interceptés par la figure. Calcul de nouveaux $M_s\uparrow$(f) et $M_s\downarrow$(f) avec (I-90) et (I-91) et $\Delta z = |z_{Ms,surf1} - z_{Ms,surf2}|$. Puis nouveaux barycentres.

  b) *Diffusion du milieu turbide* : Si $\mathcal{W}_1(\Omega)$ quitte la cellule

  ❶ *Sans interception* : $W_1(\Omega) + W_M(\Omega)$ quittent la cellule. Nouveaux $M_s\uparrow$ et $M_s\downarrow$

  ❷ *Avec interception* : $W_{1,int}(\Omega) + W_M(\Omega)$ interceptés par la surface. Nouveaux $M_s\uparrow$ et $M_s\downarrow$.

2) ***Un rayon traverse la cellule et est intercepté par une surface opaque*** (Figure I.31.b)

- **Itération k**: calcul de $W_{surf,int}(\Omega)$, $M_s\uparrow(f)$ et $M_s\downarrow(f)$ avec (I-90) et (I-91) et $\Delta z = |z_{in} - z_{Ms,surf}|$ où z_{in} = altitude d'entrée du rayon dans la cellule, puis nouveaux barycentres $M_s\uparrow(f)$ et $M_s\downarrow(f)$.
- **Itération k+1** : comme l'itération k+1 du cas 1.

Tableau I.6 : Les 2 algorithmes de gestion du transfert radiatif dans une cellule "mixte". Le rayon incident sur la cellule traverse celle-ci sans et avec interception par une surface opaque.

I.4.5 Principes de l'émission thermique

- **Loi de Planck**

La luminance d'un corps noir est isotrope et ne dépend que de sa température T et du domaine spectral λ. Elle est donnée ($W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$) par la loi de Planck :

$$dL_B(\lambda,T) = \frac{2 \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot \left[\exp\left(\frac{h \cdot c}{k \cdot \lambda \cdot T} \right) - 1 \right]} \cdot d\lambda \qquad \text{(I-93)}$$

où c est la vitesse de la lumière ($2{,}997925.10^8$ $m.s^{-1}$)

h est la constante de Planck ($6.62618.10^{-34}$ J.s)

k est la constante de Boltzmann ($1.38066.10^{-23}$ $J.K^{-1}$)

$h.\frac{c}{\lambda}$ est l'énergie des photons de fréquence $\nu=\frac{c}{\lambda}$.

Le rayonnement du corps noir étant isotrope, son émittance spectrale ($W.m^{-2}.\mu m^{-1}$) est indépendante de l'angle d'émission $|\Omega_v.\Omega_n|$:

$$M_B(\lambda,T) = \int_{2\pi} L_B(\lambda,T).|\Omega_v.\Omega_n|.d\Omega_v = \pi.L_B(\lambda,T) \qquad \text{(I-94)}$$

La majeure partie de $M_B(\lambda,T)$ provient sur intervalle spectral relativement étroit centré sur λ_{max} (μm) correspondant au maximum de (I-93) et donnée par la loi de Wien :

$$\lambda_{max} = \frac{2897.8}{T} \qquad \text{(I-95)}$$

Le soleil est souvent considéré comme un corps noir à 5900K avec un maximum d'émission dans le visible, à $\lambda_{max} \approx 0.49\ \mu$m. L'émission des surfaces terrestres est en première approximation représentée par celle d'un corps noir à ≈ 280-300 K, dont le maximum d'émission se situe entre 9.65 - 10.35 μm.

L'émittance totale ($W.m^{-2}$) rayonnée par un corps noir sur tout le spectre est : $M_B(T) = \sigma.T^4$
où σ est la constante de Stéphan-Boltzmann ($5.669.10^{-8}\ W.m^{-2}.K^{-4}$).

La luminance totale associée s'écrit :

$$L_B(\lambda) = \int_0^{\infty} L_B(\lambda,T).d\lambda = \frac{M_B(T)}{\pi} \qquad \text{(I-96)}$$

- ***Loi de Kirchhoff et émissivité***

La matière (sol, gaz, *etc*.) rayonne moins qu'un corps noir de même température. En effet, contrairement au corps noir, son équilibre thermodynamique dépend de mécanismes d'échange d'énergie (diffusion, échanges de chaleur) autres que l'absorption et l'émission. L'efficacité d'émission de la matière par rapport au corps noir est appelée émissivité spectrale $\varepsilon_d(\lambda,T,\Omega_v)$, pour la longueur d'onde λ, la température T et la direction d'émission (Ω_v). D'après la loi de Kirchhoff, elle est égale au rapport des efficacités d'absorption $q_a(\lambda,T,\Omega_v)$ et d'extinction $q_e(\lambda,T,\Omega_v)$:

$$\varepsilon_d(\lambda,T,\Omega_v) = \frac{q_a(\lambda,T,\Omega_v)}{q_e(\lambda,T,\Omega_v)} \qquad \text{(I-97)}$$

- Surface opaque : $q_e(\lambda,T,\Omega_v) = 1$ et $\varepsilon_d(\lambda,T,\Omega_v)\ 1 - \rho_{dh}(\lambda,T,\Omega_v)$
- gaz de particules (densité N, albédo sphérique ω, section σ): $\varepsilon_d(\lambda,T,\Omega_v) = \frac{q_a(\lambda,T,\Omega_v)}{q_e(\lambda,T,\Omega_v)} = 1 - \omega$

où $\alpha_a(\lambda,T,\Omega_v) = N.q_a(\lambda,T,\Omega_v).\sigma = \alpha_e(\lambda,T,\Omega_v) - \alpha_d(\lambda,T,\Omega_v)$ et $\alpha_d(\lambda,T,\Omega_v) = \omega(\lambda).\alpha_e(\lambda,T,\Omega_v)$

L'absorptance α_a, l'albédo sphérique ω et ε_d sont souvent supposés varier beaucoup avec λ, et peu ou pas varier avec T et Ω_v :

$$\omega(\lambda) = \frac{\alpha_d(\lambda)}{\alpha_a(\lambda)+\alpha_d(\lambda)} \quad \text{et} \quad \varepsilon(\lambda) = \frac{\alpha_a(\lambda)}{\alpha_a(\lambda)+\alpha_d(\lambda)} \qquad \text{(I-98)}$$

I.4.6 Émission d'une cellule turbide "Air"

- ***Cellules "Air" de l'atmosphère MA et HA***

Les cellules *Air* ont une émission volumique isotrope selon la loi de Planck, pondérée par l'émissivité $\varepsilon(\lambda) = 1 - \omega(\lambda)$. L'émission est calculée "couche par couche" à l'aide de 2 termes définis à chaque altitude : coefficient d'extinction $\alpha_e(\lambda)$ et albédo $\omega(\lambda)$ (I-98). La densité atmosphérique étant faible, les rayons émis ont une direction qui passe par le centre de la cellule émettrice, et une origine dans le plan supérieur (direction montante) ou inférieur (direction descendante) qui borne cette cellule.

Le flux (Figure I.33) $W_A(\lambda,T,\Omega)$ émis selon $(\Omega, \Delta\Omega)$ par une cellule de hauteur Δz à la longueur d'onde λ est le flux ($W.\mu m^{-1}$) qu'un parallélépipède horizontal de surface dS, épaisseur dz et température T émet :

$$W_A(\lambda,T,\Omega) = dS.\alpha_a(\lambda).L_B(\lambda,T).\Delta\Omega \int_0^{\Delta z} e^{-\alpha_e(\lambda).z/\cos\theta}.dz \qquad \text{(I-99)}$$

$$W_A(\lambda,T,\Omega) = \varepsilon(\lambda).L_B(\lambda,T).dS.\cos\theta.[1 - e^{-\alpha_e(\lambda).\Delta z/\cos\theta}].\Delta\Omega = L_A(\lambda,T).S_{eff}.\Delta\Omega$$

où $L_A(\lambda,T)$ est la luminance atmosphérique ($W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$).

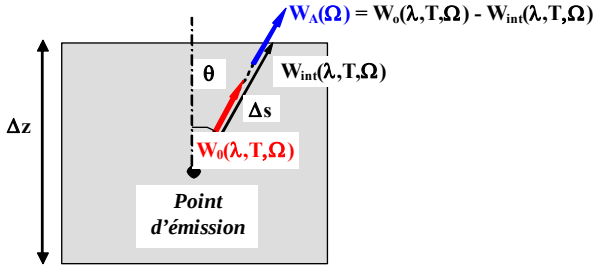


Figure I.33:
Schéma de l'émission des cellules "air"

$$W_0(\lambda,T,\Omega) = \varepsilon(\lambda).L_B(\lambda,T).dS.\cos\theta.\Delta\Omega$$

$$W_{int}(\lambda,T,\Omega) = W_0(\lambda,T,\Omega)e^{-\alpha_e(\lambda).\Delta z/\cos}$$

- ***Cellules "Air" du paysage terrestre***

Les simulations (modes R et T) peuvent tenir compte de l'air de BA (*e.g.*, pour des paysages 3-D pollués et/ou de grande étendue). L'ensemble $\mathcal{A}$ des termes nécessaires (température et propriétés optiques : $\alpha_a(\lambda)$, $\alpha_e(\lambda)$) des gaz et des aérosols sont pré-calculés. Pour le mode monospectral sans T-R. atmosphérique, $\mathcal{A}$ est déduit des paramètres entrés $\{H_m, H_p, \tau_m, \tau_p, T_{air}, etc.\}$. Autrement, $\mathcal{A}$ est déduit de la base de données atmosphérique. Tout ou partie des pré-calculs sont réalisés selon que le T-R. dans l'atmosphère est simulé ou non.

I.4.7 Émission d'une cellule turbide de végétation

- **Approche théorique**

Le flux d'ordre 1 $W_{1,f}(\lambda,\Omega_v)$ émis selon $(\Omega_v,\Delta\Omega_v)$ par une cellule turbide de volume V_{cell} est obtenue par intégration de l'émission de tous les éléments d_v de V_{cell}. L'intégration numérique est calculée sur les F_e ($F_e \leq 3$) faces de la cellules participant à l'émission suivant Ω_v (*i.e.* faces A et B sur la *Figure I.34*b). En pratique, ces F_e faces sont discrétisées en IxJ surfaces élémentaires S_{ij} avec $i \in [1; I]$ et $j \in [1; J]$.

Soit la distance du trajet optique selon Ω_v entre le centre de S_{ij} et la face de sortie f de normale Ω_n notée L_{ij} (*Figure I.34*a), le flux d'ordre 1 émis selon Ω_v à travers l'élément de surface S_{ij} est :

$$dW_{ij}(\lambda,\Omega_v,T) = L(\lambda,T).G(\Omega_v).u_f.\Delta\Omega_v. \int_{V(f,\Omega_v)} \exp[-G(\Omega_v).u_f.\Delta l(dV)].dV$$
$$dW_{ij}(\lambda,\Omega_v,T) = L(\lambda,T).|\Omega_n.\Omega_v|.\Delta\Omega_v.\{1 - \exp[-G(\Omega_v).u_f.L_{ij}]\}.S_{ij} \quad \text{(I-100)}$$

où $V(f,\Omega_v)$ est le volume de la cellule dont l'émission selon (Ω_v) passe par la face *f* et $L(\lambda,T)=\varepsilon_f.\ L_B(\lambda,T)$ la luminance d'un élément foliaire d'émissivité ε_f de température *T* à la longueur d'onde λ.

L'énergie émise totale (ordre 1) qui traverse la face *f* est donc :

$$W_{1,f}(\lambda,\Omega_v) = \Sigma_{i,j}\, dW_{ij}(\Omega_v) = L(\lambda,T).|\Omega_n.\Omega_v|.\Delta\Omega_v.\Sigma_{i,j}\,\{1 - \exp[-G(\Omega_v).u_f.L_{ij}]\}.S_{ij} \quad \text{(I-101)}$$

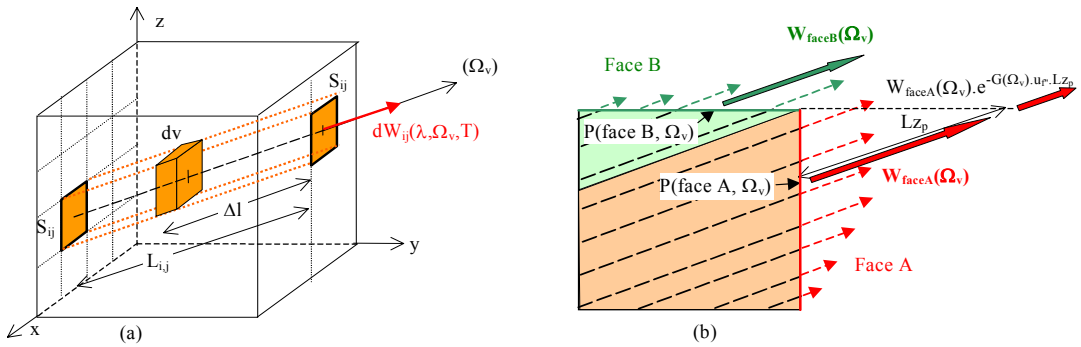


Figure I.34 : Calcul de l'émission thermique d'une cellule turbide (T,u_f,LAD) par intégration volumique de l'émission directionnelle de dv : schéma (a) 3-D et (b) en coupe pour 2 directions Ω_v.

- **Diffusions intra cellule**

Une partie de l'énergie thermique émise est interceptée avant de sortir de la cellule, entraînant des diffusions d'ordre 1 et plus. Le calcul de ces diffusions n'est pas exact. Comme pour la diffusion (c.*f.* I.4.3), il repose sur le calcul de l'énergie interceptée sur toutes les N_{dir} directions.

En effet, sachant que l'interception totale du rayonnement émis selon la direction (Ω_v) est :

$$W_{int}(\lambda,\Omega_v,T) = L(\lambda,T).G(\Omega_v).u_f.\Delta\Omega_v.\left\{V_{cell} - |\Omega_n.\Omega_v|.\sum_k \sum_{i,j} \left[\frac{1- e^{-G(\Omega_v).u_f.L_{ij}}}{G(\Omega_v).u_f}.S_{ij}\right]\right\} \quad \text{(I-102)}$$

L'interception totale du flux émis selon 4π est la somme de $W_{int}(\lambda,\Omega_v,T)$ sur les N_{dir} directions discrètes :

$$W_{int}(\lambda,T) = \sum_{v=1}^{N_{dir}} W_{int}(\lambda,\Omega_v,T) \quad \text{(I-103)}$$

L'hypothèse d'isotropie du rayonnement diffus est utilisée pour exprimer en tant que série géométrique la puissance totale, due aux diffusions multiples, qui quitte la cellule :

$$W_M(\lambda,T) = W_{int}(\lambda,T).\{\omega_{j,\lambda}.<T_i> + \omega_{j,\lambda}.<T_i>.[\omega_{j,\lambda} - \omega_{j,\lambda}.<T_i>] + \omega_{j,\lambda}.<T_i>.[\omega_{j,\lambda} - \omega_{j,\lambda}.<T_i>]^2 + ...\}$$

$$\Rightarrow\ W_M(\lambda,T) \approx \left[\frac{\omega_{j,\lambda}.<T_i>}{1 - \omega_{j,\lambda}.[1 - <T_i>]}\right].W_{int}(\lambda,T) \quad \text{(I-104)}$$

où l'albédo de simple diffusion $\omega_{j,\lambda}$ est la somme d'un albédo "diffus" $\omega_{dj,\lambda}$ et d'un albédo "spéculaire" $\omega_{sj,\lambda}$ associés aux éléments foliaires d'espèce *j* de la cellule *i* à la longueur d'onde λ.

Le coefficient de transmission moyen $<T_i>$ est la moyenne des facteurs de transmission sur tous les trajets $\Delta m_i(\Omega)$, trajets entre le centre et les faces de la cellule *i* :

$$<T_i> = \int_{4\pi} e^{-G(j,\Omega).uf(i).\Delta mi(\Omega)} = \frac{1}{4\pi} \sum_{v=1}^{N_{dir}} [T(j,\Omega_v)]^{uf(i).\Delta mi(\Omega v)}.\Delta\Omega_v \quad \text{(I-105)}$$

La distribution directionnelle de $W_M(\lambda,T)$ dans l'espace 4π est déterminée en supposant que $W_M(\lambda,\Omega_v,T)$ est proportionnel à $\Delta\Omega_v$ et à la section efficace de diffusion des éléments foliaires selon Ω_v :

$$W_M(\lambda,\Omega_v,T) = W_M(\lambda,T).\frac{TG(j,\lambda,\Omega_v).\Delta\Omega_v}{\sum_{v=1}^{N_{dir}} TG(j,\lambda,\Omega_v).\Delta\Omega_v} \quad \text{(I-106)}$$

où $TG(j,\lambda,\Omega_v) = \sum_{s=1}^{N_{dir}} T_d(j,\lambda,\Omega_s,\Omega_v).G(\Omega_s).\Delta\Omega_s$ et $T_d(j,\lambda,\Omega_s,\Omega_v) = \int_{\Delta\Omega_v} \frac{\int_{2\pi} \frac{g_f(j,\Omega_f)}{2\pi}.|\Omega_s.\Omega_f|.f_d(j,\lambda,\Omega_f,\Omega_s\rightarrow\Omega_v).d\Omega_f}{G(j,\Omega_s)}.d\Omega_v$

La fonction de phase foliaire se déduit de (I-60) avec $\tau_f(\Psi_{fs})= 0$.

Avec F_e faces vues selon Ω_v ($F_e \leq 3$), on a : $$W_M(\lambda,\Omega_v,T)=\sum_{f=1}^{F_e} W_{M,f}(\lambda,\Omega_v,T) \quad \text{(I-107)}$$

En première approximation $W_{M,f}(\lambda,\Omega_v,T)$ est proportionnel à la surface foliaire S_{eff} efficace :

$$W_{M,f}(\lambda,\Omega_v,T) = \frac{S_{eff}(u_f,LAD,\Omega_v,f)}{\sum_{v=1}^{F_e} S_{eff}(u_f,LAD,\Omega_v,f)}.W_M(\lambda,\Omega_v,T) = \frac{W_{1,f}(\lambda,\Omega_v,T)}{\sum_{v=1}^{F_e} W_{1,f}(\lambda,\Omega_v,T)}.W_M(\lambda,\Omega_v,T) \quad \text{(I-108)}$$

où d'après (I-100) et (I-101), $S_{eff}(u_f,LAD,\Omega_v,f) = G(\Omega_v).u_f.\int_{V(f,\Omega_v)} \exp[-G(\Omega_v).u_f.\Delta l(dV)].dV = = \frac{W_{1,f}(\lambda,\Omega_v,T)}{L(\lambda,\Omega_v,T)}$

Le rayonnement total émergeant de la cellule par la face *f* selon Ω_v est la somme de 2 contributions :

$$W_{face,f}(\lambda,\Omega_v,T) = W_{1,f}(\lambda,\Omega_v,T) + W_{M,f}(\lambda,\Omega_v,T) \quad \text{(I-109)}$$

En fait, d'après (I-101), (I-102) et (I-104), la puissance qui traverse la face *f* est le produit de la luminance de Planck $L_B(\lambda,T)$ par un facteur $H_f(u_f,LAD,\Omega_v,f)$ indépendant de *T* qui prend en compte la section efficace foliaire directionnelle ainsi que les diffusions multiples dans la cellule :

$$W_{face,f}(\lambda,\Omega_v,T) = L_B(\lambda,T).\ H_f(u_f,LAD,\Omega_v,f) \quad \text{(I-110)}$$

où $H_f(u_f,LAD,\Omega_v,f)=S_{eff}(u_f,LAD,\Omega_v,f).\Delta\Omega_v.[1+\frac{S_{eff}(u_f,LAD,\Omega_v,f)}{\sum_{v=1}^{F_e} S_{eff}(u_f,LAD,\Omega_v,f)}.\frac{TG(\Omega_v).\Delta\Omega_v}{\sum_{v=1}^{N_{dir}} TG(\Omega_v).\Delta\Omega_v}.\frac{\omega_\lambda.<T>}{1-\omega_\lambda.[1-<T>]}.G(\Omega_v).u_f.\int_{V_{cell}}(1-e^{-G(\Omega v).uf.\Delta l(dv)}).dv]$

Etant très coûteux en temps calcul, $H_f(u_f,LAD,\Omega_v,f)$ est pré-calculé pour 10 valeurs de u_f pour chaque espèce foliaire *j*. Si la maquette possède au plus 10 valeurs de u_f, alors les 10 valeurs utilisées pour le pré-calcul sont égales aux valeurs de u_f comprises dans la maquette. Si la maquette inclus plus de 10 valeurs de u_f, alors les 10 valeurs utilisées pour le pré-calcul sont des valeurs équidistantes entre les valeurs minimale et maximale présentes dans la maquette. Durant la simulation du T-R, le H_f associé à une cellule dont le u_f diffère de celui utilisé pour les pré-calculs, est alors calculé par interpolation bilinéaire sur les H_f pré-calculés.

La précision de $W(\lambda,\Omega_v,T,f)$ dépend de la précision de H_f et donc du niveau de discrétisation des faces cachées en surfaces élémentaires S_{ij} lors du calcul de l'émission W_1 et de la diffusion W_M des cellules

foliaires. L'estimation de $W(\lambda,\Omega_v,T,f)$ est d'autant plus précise que cette discrétisation est fine (*i.e.*, nombre I_xJ élevé de S_{ij}). Par défaut : I = J = 50 donne des erreurs < 0.01K. Elle peut être modifiée.

- **Prise en compte des cellules voisines**

L'origine du trajet des rayons émis $W_{face,f}$ n'est pas un centre de face, car (1) la distribution spatiale de $W_{face,f}(\Omega_v,i,j)$ n'est pas uniforme sur la face *f* et (2) les rayons $W_{face,f}(\Omega_v,i,j)$ n'ont pas les mêmes trajets dans les cellules voisines de la cellule émettrice. Le "$W_{face,f}(\Omega_v)$ transmis depuis le centre de la face *f* à travers plusieurs cellules turbides voisines" diffère donc de la somme des $W_{face,f}(\Omega_v,i,j)$ transmis. Ainsi, pour une direction montante dans le plan Oyz (*Figure I.34*.b), avec des cellules voisines de la cellule émettrice caractérisées par un coefficient de projection $G(\Omega_v)$ et une densité volumique foliaire $u_{f''}$:

$$W_{face\ k}(\Omega_v).\exp[-G(\Omega_v).u_{f''}.\Delta l_{centre}] \neq <\Sigma_{i,j}\ W_{face\ k}(\Omega_v,i,j).\exp[-G(\Omega_v).u_{f''}.\Delta l_{i,j}] \qquad \text{(I-111)}$$

où $\Delta l_{i,j}$ = distance entre la surface dS_{ij} et le plan horizontal de la face supérieure de la cellule émettrice.

La solution retenue est précise pour tout type de cellule turbide et non coûteuse en temps calcul : il est recherché le point *P* tel que l'énergie $W_{face,f}(\Omega_v)$ transmise depuis *P* à travers plusieurs cellules turbides voisines est égale à la somme des énergies $W_{face,f}(\Omega_v,i,j)$ transmises. En pratique, les coordonnées x_p et z_p de tout point origine de la face verticale droite A (*Figure I.34*.b) sont déterminées par 2 équations :

- x_p : $W_{face,f}.\exp[-G(\Omega_v).u_{f''}.Lx_p] = \int_S\int W(x,z,\Omega_v,u_f,LAD,\lambda,T).\exp[-G(\Omega_v).u_{f''}.Lx].dS$ (I-112)
- z_p : $W_{face,f}.\exp[-G(\Omega_v).u_{f''}.Lz_p] = \int_S\int W(x,z,\Omega_v,u_f,LAD,\lambda,T).\exp[-G(\Omega_v).u_{f''}.Lz].dS$ (I-113)

où Lz : distance selon $\Omega_v(\theta_v;\varphi_v)$ entre un point de la face *f* et le plan horizontal qui contient la face supérieure ($\cos\theta_v = \mu_v > 0$) ou inférieure ($\mu_v < 0$) de la cellule. Lz_p est pour le point *P* de la face *f*.

Lx : distance selon Ω_v entre un point de la face *f* et le plan vertical qui contient la face avant ou arrière de la cellule, selon que Ω_v va vers l'avant ou l'arrière. Lx_p est pour le point *P* de la face *f*.

u_f : densité de la 1ère cellule traversée par le rayon issu de *P* selon (Ω_v). $u_f = 0$ pour une cellule vide.

L'énergie qui sort de la cellule selon Ω_v par la face *f* est proportionnelle à "$L_B(\lambda,T)$ x section efficace dS_{eff} de la face selon Ω_v". La position de *P* dépend de la distribution directionnelle relative de l'énergie émise par la cellule. Pour la face de cellule dans le plan $\{y=\Delta Y\}>0$, cette distribution est donnée par :

$$F(x,z,\theta_v,\varphi_v,u_f,LAD) = \frac{W(x,z,\theta_v,\varphi_v,u_f,LAD,T,\lambda)}{L_B(\lambda,T).dS_{eff}} \qquad \text{(I-114)}$$

où les coordonnées x et z représentent le lieu du point d'émission de la face.

La *Figure I.35* donne la distribution relative F de l'énergie émise par les faces avant, droite et haut d'une cellule turbide sphérique très dense ($u_f = 5\,m^2.m^{-3}$) cubique ($\Delta X=\Delta Y=\Delta Z=0.5m$), pour la direction $(\theta_v,\varphi_v)=(60,72)$. L'origine des coordonnées est le centre des faces (x, y et $z \in [-0.25\ 0.25]$). Les courbes F ont une forme générique (*Figure I.35*.d) composée de 3 zones (A, B, C) séparées par une courbe exponentielle et caractérisées par 6 paramètres (A1, A2, A3, B1, B2, B3). F est exponentielle sur A et B

et constante sur C. Ces courbes tendent à devenir des surfaces planes si le LAI devient faible. Ces remarques suggèrent de remplacer les expressions intégrales de F par des expressions analytiques.

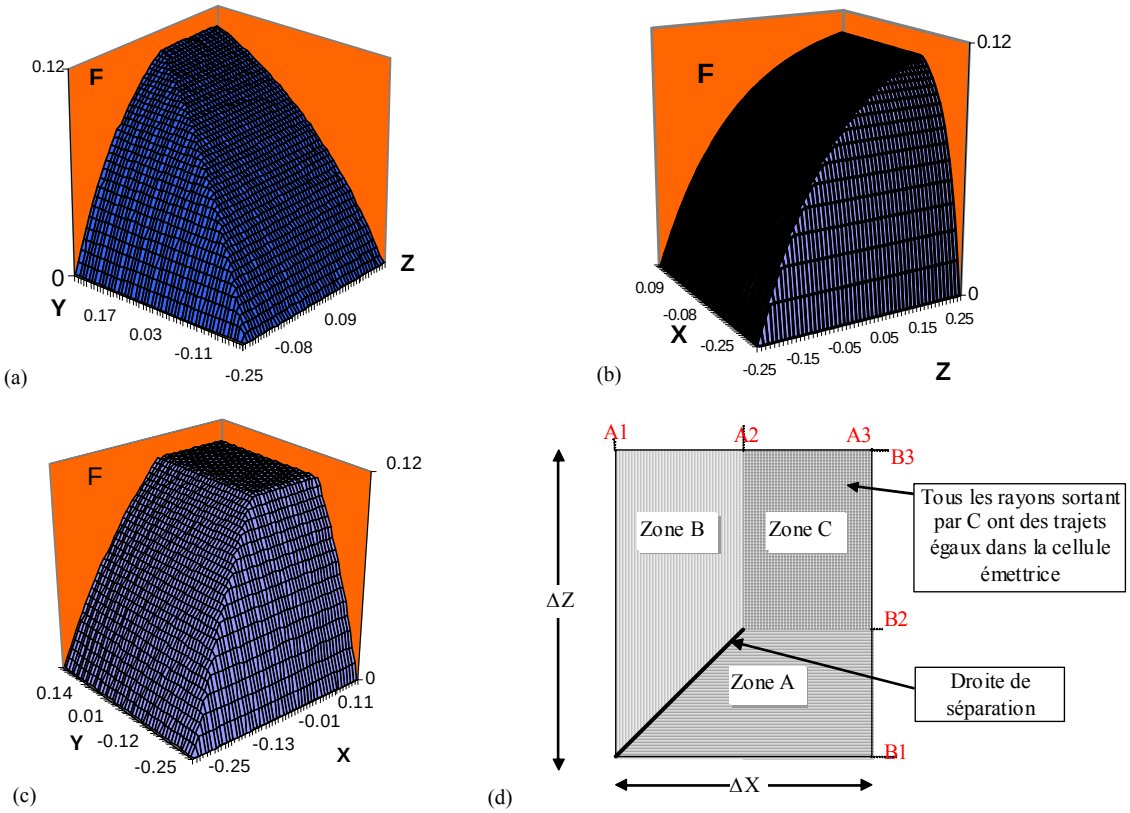


Figure I.35 : Distributions 3-D relatives (a,b,c) et représentation schématique plane (d) de l'énergie émise par les faces d'une cellule turbide. a) Face avant (x = ΔX): F(y, z, u_f, LAD). b) Face droite (y = ΔY): F(x, z, u_f, LAD). c) Face du dessus (z = ΔZ): F(x, y, u_f, LAD). u_f = 5 $m^2.m^{-3}$. ΔY = ΔZ = 0.5 m. LAD sphérique. (θ_v, φ_v) = (60, 72)

Seul le cas de la face droite (y = ΔY) est illustré ici : F(x, z, u_f, LAD)

- $\forall$ M(x,z) $\in$ zone A ($z<B2$ et $z<a.\frac{2x+\Delta X}{2}-\frac{\Delta Z}{2}$): $F_A(x,z,u_f,LAD)=\frac{\xi.[1-\exp\{-signe2.u_f.\Delta Y.\frac{(z-B1)}{|a|}\}}{1-\exp\{-signe2.u_f.\Delta Y.\frac{(B3-B1)}{|a|}\}}$ (I-115)

- $\forall$ M(x,z) $\in$ zone B ($x<A2$ et $z>a.\frac{2x+\Delta X}{2}-\frac{\Delta Z}{2}$: $F_B(x,z,u_f,LAD)=\frac{\xi.[1-\exp\{-signe1.u_f.\Delta Y.(x-A1)\}}{1-\exp\{-signe1.u_f.\Delta Y.(A3-A1)\}}$ (I-116)

- $\forall$ M(x,z) $\in$ zone C ($x\in[A2\ A3]$ et $z\in[B2\ B3]$) : $F_C(x,z,u_f,LAD)=\xi=\Delta\Omega_v.\{1-e^{-G(\Omega_v).u_f.L_{max}}\}$ (I-117)

où L_{max} représente la plus grande distance parcourue par un rayon dans une cellule, le terme a = $\frac{B2-B1}{A2-A1}$ permet d'assurer la continuité entre les courbes F_A et F_B. Les 2 grandeurs *signe1* et *signe2* sont les signes respectifs des expressions (A3 - A1) et (B3 - B1).

La fonction F convient toujours (*i.e.* 3 faces d'émission), sauf si la direction d'émission Ω_v est parallèle à une face (*e.g.* φ_v= 90°). Alors, l'émission selon Ω_v ne provient que de 1 ou 2 faces (*e.g.* θ_v=0, φ_v=0).

Les 3 coordonnées (une est à priori connue) de tout point origine sur les faces de la cellule sont calculées en intégrant F sur chaque face. Ainsi, pour la face droite de la cellule (y=ΔY), il faut vérifier :

$$\begin{aligned} &W_{face}.\exp[-G(\Omega_v).u_{f''}.Lx_p].\int_{Face}\!\!\int (F_A + F_B + F_C).L_B(\lambda,T).\exp[-G(\Omega_v).u_{f''}.Lx].dS_{eff} \\ &W_{face}.\exp[-G(\Omega_v).u_{f''}.Lz_p].\int_{Face}\!\!\int (F_A + F_B + F_C).L_B(\lambda,T).\exp[-G(\Omega_v).u_{f''}.Lz].dS_{eff} \end{aligned} \quad \text{(I-118)}$$

Connaissant les vecteurs directeurs normalisés des N_{dir} directions discrètes $\Omega_v(\Omega_{v,x};\Omega_{v,y};\Omega_{v,z})$:

$$\Omega_{v,x} = \sin\theta_v.\cos\varphi_v\ ; \qquad \Omega_{v,y} = \sin\theta_v.\sin\varphi_v\ ; \qquad \Omega_{v,z} = \cos\theta_v \quad \text{(I-119)}$$

Et vu que : $L\alpha = \dfrac{n_\alpha.\frac{\Delta\alpha}{2} - \alpha}{\Omega_{v,\alpha}}$ où n_α=-signe($\Omega_{v,\alpha}$) pour α=x ou y et n_α=signe($\Omega_{v,\alpha}$) pour α=z (I-120)

Les coordonnées de P(x_p,ΔY,z_p) sur la face droite de la cellule, par rapport au centre de celle-ci, sont :

$$x_p = n_x.\frac{\Delta X}{2} + \frac{\Omega_{v,x}}{G(\Omega_v).u_{f''}} \ln\left(\frac{\int_{Zone\ A}\!\!\int F_A.T_{m,x}.dS_{eff} + \int_{Zone\ B}\!\!\int F_B.T_{m,x}.dS_{eff} + \int_{Zone\ C}\!\!\int F_B.T_{m,x}.dS_{eff}}{W_{face}}\right) \text{ où } T_{m,x} = L_{max}.e^{-G(\Omega_v).u_{f''}.Lx} \quad \text{(I-121)}$$

$$z_p = n_z.\frac{\Delta Z}{2} + \frac{\Omega_{v,z}}{G(\Omega_v).u_{f''}} \ln\left(\frac{\int_{Zone\ A}\!\!\int F_A.T_{m,z}.dS_{eff} + \int_{Zone\ B}\!\!\int F_B.T_{m,z}.dS_{eff} + \int_{Zone\ C}\!\!\int F_B.T_{m,z}.dS_{eff}}{W_{face}}\right) \text{ où } T_{m,z} = L_{max}.e^{-G(\Omega_v).u_{f''}.Lz} \quad \text{(I-122)}$$

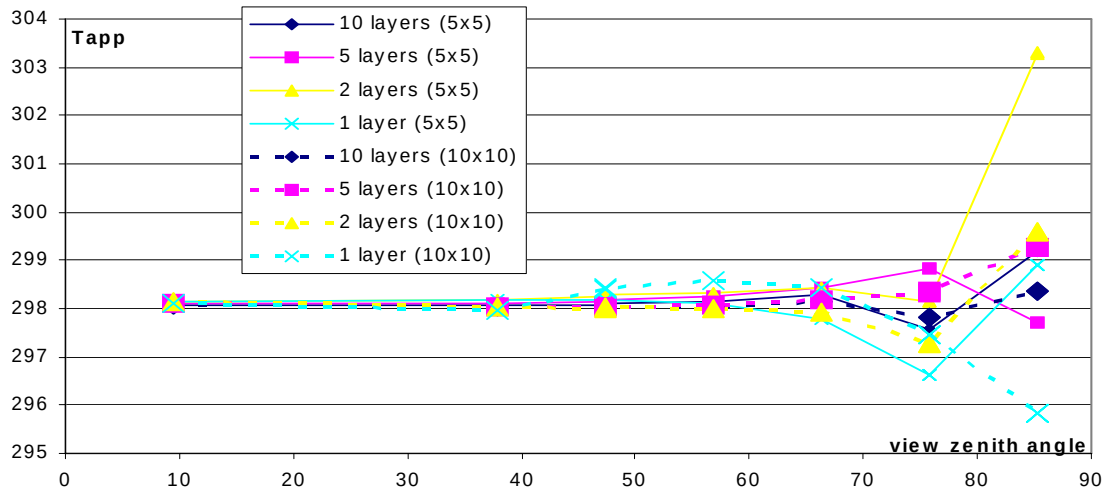


Figure I.36: Précision de $T_{app}(\Omega_v)$ selon l'angle zénithal de visée. Discrétisation N_{sf} (5x5 ou 10x10), avec 1, 2, 5 et 10 couches. LAI=5. ϕ_{sv} = 90°. ε_f = 1 et T_f = 298K.

I.4.8 Émission d'une cellule mixte

Comme déjà indiqué (*cf.* I.4.4), une cellule mixte comprend (1) N_{surf} différentes surfaces opaques et (2) N_{turb} différents milieux turbides. Les N_{surf} figures sont caractérisées par leurs propriétés optiques $\{\varepsilon_{surf,u}[\Omega_s,\Omega_v)],...\}$ et géométriques $\{M_{s,surf,u}$ *i.e.* barycentre géométrique$\}$, ainsi que par leurs températures $T_{surf,u}$ et leurs surfaces dans la cellule S_u où u ∈ [1 N_{surf}]. De même, chaque *t* milieu turbide est caractérisé

par son LAD, sa température $T_{f,t}$ et son émissivité ε_{ft} où t ∈ [1 N_{turb}]. La Figure I.37 indique comment l'émission thermique (mode (T) du modèle DART) d'une cellule mixte est modélisée. Seule l'itération 2 diffère de l'approche utilisée lors de la modélisation en mode (R).

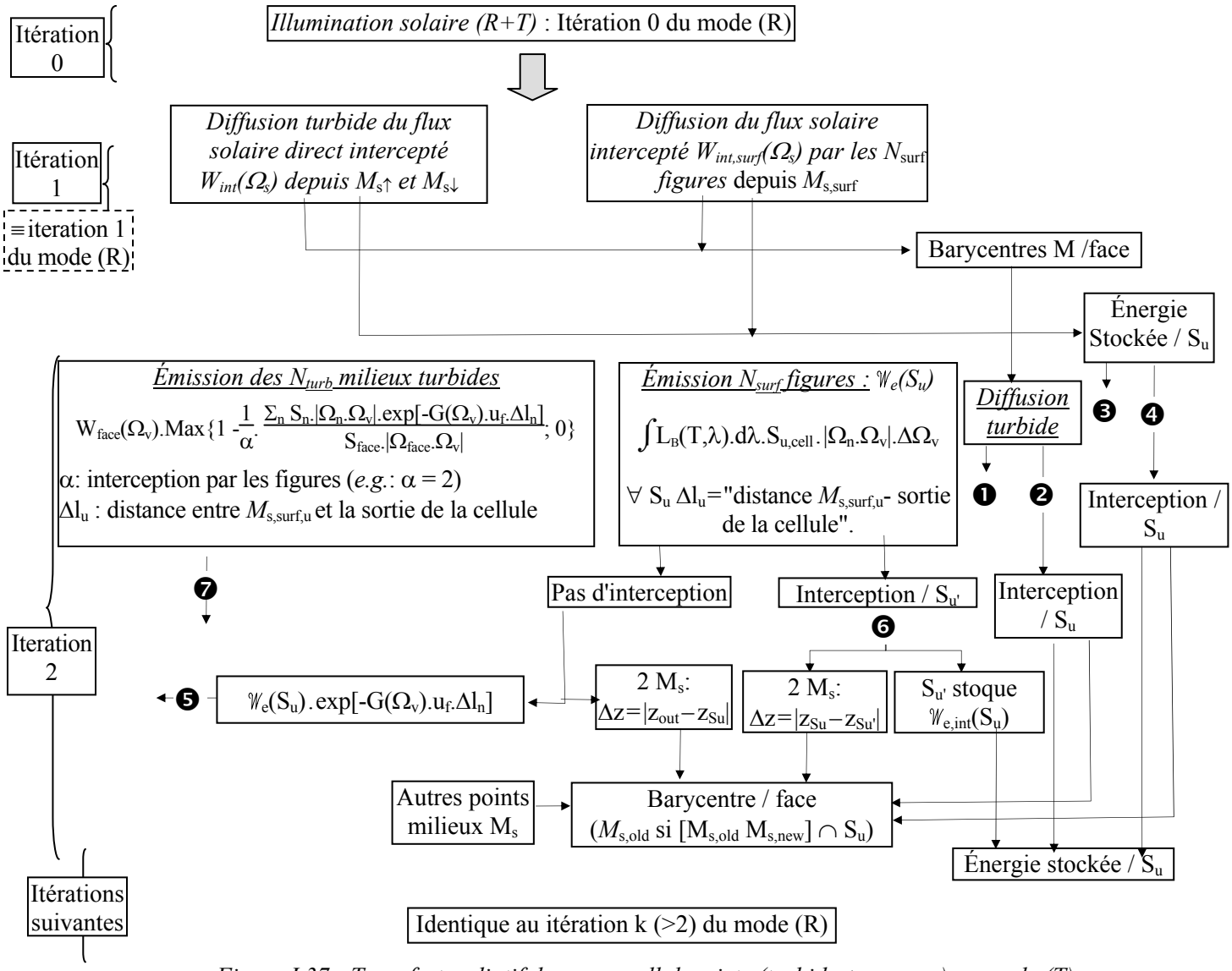


Figure I.37 : Transfert radiatif dans une cellule mixte (turbide + opaque) en mode (T).

- **Itération 0** : éventuelle illumination solaire (R + T). Etape identique à l'itération 0 du mode (R).
- **Itération 1** : diffusion du flux solaire direct intercepté à l'itération 0, par les cellules turbides et les surfaces opaques. L'interception de ce rayonnement diffusé est stockée en tant que barycentre par face de cellule turbide et par surface opaque.
- **Itération 2** : émission thermique des cellules turbides et des surfaces opaques. Cette étape n'existe pas en mode (R). Le rayonnement intercepté est stocké en tant que barycentre par face de cellule turbide, par surface opaque et par cellule au sein de la cellule émettrice.
- **Itérations > 2** : diffusion des cellules turbides et opaques. Cette étape est identique au mode (R).

L'émission thermique des cellules turbides est gérée en affectant l'émission thermique qui surviendrait en l'absence de surfaces opaques dans la cellule d'un coefficient de pondération qui tient compte de la présence de surfaces opaques susceptibles d'intercepter les rayons émis par le milieu turbide selon la direction (Ω_v). La proportion a-1 de surfaces opaques capables d'intercepter est à priori fixée par $\alpha = 2$.

L'émission des surfaces opaques est calculée en tenant compte de la température et de l'aire des surfaces opaques comprises dans la cellule, ainsi que de la ou des bandes spectrales considérées.

I.5 MODES DE FONCTIONNEMENT ET PRODUITS DART

I.5.1 Présentation

Le module *Dart* peut fonctionner en monospectral (1 bande spectrale) ou multispectral (Q bandes spectrales), selon le mode (R) ou (T), avec ou sans transfert radiatif (T-R) atmosphérique (*Figure I.38*). Le fonctionnement multispectral offre la possibilité de simuler une seule bande spectrale. Il diffère du cas monospectral dans le sens où les propriétés optiques des matériaux sont extraites d'une base de données "réflectance" (BDR) et interpolées pour tous les canaux. Si le T-R atmosphérique est activé, la l'atmosphère est spécifiée avec des paramètres entrés par l'opérateur (fonctionnement monospectral ou mutlispectral avec Q = 1) ou calculés à partir d'une base de données atmosphérique (BDA : c*f.* I.2.3).

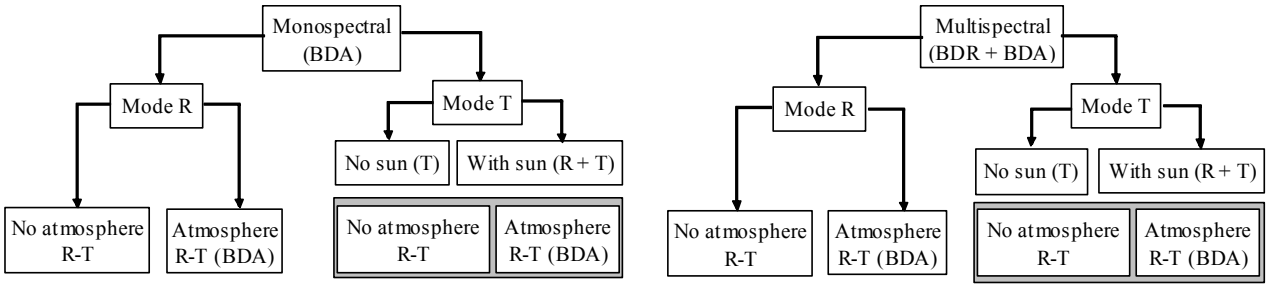


Figure I.38: Résumé des différents fonctionnements de DART. Mode R et T avec et sans transfert radiatif (R-T) atmosphérique. Bases de données "réflectance" (BDR) et "atmosphère" (BDA).

Toute simulation DART (*Figure I.39*) est gérée par une interface graphique "*DARTI*" utilisée pour entrer tous les paramètres, lancer les exécutables (*Direction*, *Phase*, *etc.*) et afficher certains résultats (maquette et produits de DART). Cette interface (*Figure I.39*) crée dans le répertoire ("./input/.") des fichiers xml (*direction.xml*, *phase.xml*, atmosphere.xml, *coeff_diff.xml*, *urban.xml*, *dart.xml*, *etc.*) utilisés en entrée par chacun des 5 exécutables (dont 1 optionnel) du système DART, pour stocker dans le répertoire ("/output") des informations utilisées par les autres exécutables.

- ***Direction.*** A partir du fichier d'entrée *direction.xml,* ce module calcule et stocke dans le fichier *directions.dir* les N_{dir} cônes $\{\Omega_i(\theta_i,\varphi_i)$, $\Delta\Omega_i$, secteur angulaire (pour diffusion foliaire) $\Omega_{sect,r}$ avec $r \in [1\ N_{sect}]\}$ qui discrétisent l'espace des directions 4π. La direction verticale montante et la direction solaire montante (*hot-spot*) sont comprises. L'espace autour du *hot-spot* peut être sur-échantillonné, de même que les plans principal (*i.e.*, direction du nadir + direction solaire) et orthogonal.

- ***Phase***. Ce module calcule à partir des 3 fichiers d'entrée (*phase.xml*, *coeff_diff.xml* et *atmosphere.xml*) (i) les propriétés optiques des différents éléments de la scène et leurs fonctions de transfert associées ainsi que (ii) les propriétés de l'atmosphère. Pour une simulation multispectrale, l'opérateur définit un nombre Q de bandes spectrales $\{[\lambda_{min}(q)\ \ \lambda_{max}(q)]$ avec $q \in [0\ \ Q-1]\}$ de travail pour que *Phase* calcule les propriétés spectrales des éléments du paysage terrestre et de l'atmosphère à partir des bases de données respectives BDR (*Tableau I.8* et Tableau I.9) et BDA sur [0.3μm 14μm].

  i) <u>*Propriétés optiques des éléments de la scène*</u> : Elles sont stockées dans le fichier *coeff_diff.src* (Tableau I.7) et *coeff_diff**q**.src* (indice q pour le cas multispectral). Il existe 2 groupes de matériaux : surfaces opaques et milieux turbides. Le 1er groupe peut être associé à 3 types de diffuseur (*cf.* paragraphes I.3.1 et I.3.2. Alors, *Phase* calcule les réflectances ρ_{hh} hémisphérique – hémisphérique ou les fonctions de transfert par diffusion (surfaces horizontales). Pour *j* milieux turbides présents, *Phase* stocke (dossier "/output/lib_phase/"), les fonctions de transfert de transmittance (*ffol(j)_transm*), de diffusion (*ffol(j)_diff**q***) et du "spéculaire + polarisé" (*ffol(j)_spec**q***) :

  - Le fichier *ffol(j)_transm* (indépendant de λ) contient $T(j,\Omega_n)_{n=1..N_{dir}}$.
  - Le fichier *ffol(j)_diff**q*** contient $T_d(j,\Omega_{sun},\Omega_v,\mathbf{q})_{v=1..N_{dir}}$, $T_d(j,\Omega_i,\Omega_v,\mathbf{q})_{i=1..N_{sect},v=1..N_{dir}}$ et $TG(j,\Omega_v,\mathbf{q})_{v=1..N_{dir}}$ (si pas de spéculaire).
  - Le fichier *ffol(j)_spec**q*** contient dans l'ordre $T_s(j,\Omega_{sun},\Omega_v,\mathbf{q})_{v=1..N_{dir}}$ (spéculaire), $T_p(j,\Omega_{sun},\Omega_v,\mathbf{q})_{v=1..N_{dir}}$ (polarisé), $T_s(j,\Omega_i,\Omega_v,\mathbf{q})_{i=1..N_{sect},v=1..N_{dir}}$, $TG(j,\Omega_v,\mathbf{q})_{v=1..N_{dir}}$, $TG_s(j,\Omega_v,\mathbf{q})_{v=1..N_{dir}}$, $S_1(j,\Omega_{sun},\Omega_v,\mathbf{q})_{v=1..N_{dir}}$, $S_{1moy}(j,\Omega_{sun},\Omega_v,\mathbf{q})_{v=1..N_{dir}}$, $S_M(j,\Omega_v,\mathbf{q})_{v=1..N_{dir}}$, $p_1(j,\Omega_v,\mathbf{q})_{v=1..N_{dir}}$.

```
*Nb Lambertien - Nb Lambertian + Specular - Nb Hapke + Specular - Nb Phase for opaque surfaces - Nb Leaf Phase*
4 0 0 0 1
* Lambertian .
Parameters : 0/1 - Name - Ro - Ecart-Type *
1  sol 0.330000 0.000000
1  tronc 0.200000 0.000000
1  toit 0.300000 0.000000
1  mur 0.300000 0.000000
* Lambertian + Specular.
Parameters : 0/1 - File Name - Ro - A - Alpha - Refraction Index - Albedo moy - Albedo spec *
* Hapke + Specular.
Parameters : 0/1 - Name - w - B0 - b1 - b2 - c1 - c2 - h - A - Alpha - Refraction Index - Albedo moy *
* Phase.
Parameters : 0/1 - File Name - Number of parameters
 if this number is 4 (Lambertan + Specular) :
- Ro - A - Alpha - Refraction Index - Albedo moy
 if this number is 10 (Hapke + Specular) :
-Albedo - B0 - b1 - b2 - c1 - c2 - h - A - Alpha - Refraction Index - Albedo moy *
* Understory.
Parameters : 0/1 - File Name - omegaMin - omegaMax - clumpingA - clumpingB - LAD - (Ellipsoidal : ALA -
Elliptical : Thetam - Eccentricity) - Dim Foliar - RoSup - RoInf - To - IndRefracInf - IndRefracSup -
TypeRugositeInf - KoInf - (Ind_RugInf) - TypeRugositeSup - KoSup - (Ind_RugSup) - Albedo moy Albedo spec *
1 feuille 1.000000 0.000000 0.000000 0.000000 1 0.010000 0.300000 0.300000 0.200000 1.400000 1.400000 0
1.000000 0 1.000000  0.500046 0.000000
*Tmin, Tmax for soil :                  * 300.000000 310.000000
```

The index 0/1 indicates if the computation of "mean reflectance" and/or transfer function already took place

*Tmin, Tmax for water : * 300.000000 310.000000 *Tmin, Tmax for roads : * 300.000000 310.000000 *Tmin, Tmax for opaque plots : * 300.000000 310.000000 *Tmin, Tmax for roofs : * 300.000000 310.000000 *Tmin, Tmax for walls : * 300.000000 310.000000 *Tmin, Tmax for Trunks : * 300.000000 310.000000 *Temperature for bounding walls: * 300.000000 *Tmin, Tmax for leaf phase function nb 0: * 300.000000 310.000000	*These temperatures are necessary for DART mode (T).*

Tableau I.7: Exemple de fichier "coeff_diff.src" pour un fonctionnement monospectral.

Avec un fonctionnement multispectral avec Q bandes, il y a Q fichiers coeff_diff.src, et chacun a 2 lignes supplémentaires en tête du fichier : bande spectrale et constante solaire (calculée avec la BDA). *Les propriétés des faces foliaires supérieure (sup) et inférieure (inf) sont distinguées. Ro: Réflectance. To: Transmittance. IndRefrac: indice de réfraction. TypeRugosite et Ko: type de rugosité et indice de rugosité. Dim Foliar est la dimension foliaire. omegaMin, omegaMax, clumpingA et clumpingB sont les paramètres de pondération de la fonction G.*

La structure de la BDR diffère selon que le matériau est minéral (réflexion de surface) ou végétal. Certaines réflectances proviennent de la base de données ASTER (*http://speclib.jpl.nasa.gov/*).

- *Matériau minéral* :

* text that describes the material * * Number of Lambda pertinent values * 491 * Lambda_min - Lambda_max * 0.42 14 * Hapke parameters: Bo - h - b1 - c1 - b2 - c2 * *1 1 1 1 1* * Lambda - Ro - Refraction Index - A - Alpha - ω_Hapke - A_Hapke_spec - Alpha_Hapke_spec * 0.42 4.522 *1.4* *1000* *0.2* *30* *1000* *0.2* ……. 14 4.029 1.4 1000 0.2 30 1000 0.2	*Lambda and Ro (lambertian reflectance) values are from the Aster data base. Other parameters are defined by the user*

Tableau I.8: Structure de fichier de la BDR d'un matériau minéral.

Les paramètres utilisés diffèrent suivant le type de diffusion :" Lambertien" {ρ : réflectance}; "Lambertien + spéculaire" {ρ, n : indice de réfraction, A : facteur multiplicatif}; "Hapke+spéculaire" {ω_H : albédo de simple diffusion, Bo, h, b1, c1, b2, c2, n, A_H, α_H }.

- *Matériau végétal* :

* Text that describes the material * * Number of Lambda pertinent values : * 550 * Lambda_min - Lambda_max : * 0.302 14 * Leaf parameters: LAD - Foliar dimension(m) - Upper type of roughness [0/1:cst/var] - Lower type of roughness * 1 (spherical) 0.05 0 0 * Lambda - Lower reflectance - Upper reflectance - Transmittance - n_{inf} - n_{sup} - Koinf [0 1] - Kosup - Ind_rugInf [0.1 0.3] - Ind_rugSup * *0.302 2.9582 2.9582 2.9582* 1.4 1.4 0.9 ……	*Base ASTER ⇒ $R_{abaxial}$, $R_{adaxial}$, transmittance* *User ⇒ n_{inf}, n_{sup}, Koinf, Kosup, Ind_rugInf, Indrug_Sup*

Tableau I.9: Structure de fichier de la BDR d'un matériau végétal. cf. légende du Tableau I.7

ii) *Propriétés de l'atmosphère* : En multispectral, la constante solaire en haut de l'atmosphère est interpolée pour les Q bandes spectrales à partir de la BDA (stockage dans *coeff_diff**q**.src*). Si le T-R atmosphérique est activé, *Phase* calcule les paramètres des fonctions de phase et les profils des coefficients d'extinction et d'absorption des gaz et aérosols à partir de la BDA (stockage dans les fichiers *atmosphere.src* et *atmosphere**q**.src* (multispectral)). Il peut les calculer avec des paramètres entrés par l'utilisateur si le mode "T-R atmosphérique monospectral" est activé.

- ***Maket***. Simulation du paysage sur lequel opère le module *Dart*. Il utilise 3 fichiers d'entrée dont 1 optionnel : *maket.xml*, *urban.xml*, *f_MNT* (si relief). La scène et les figures planes associées sont stockées respectivement dans le fichier *mak* (cf. I.2.1) et le fichier *figures.src* (Tableau I.10). Dans le cas d'un MNT, *f_MNT* est un fichier raster (même taille que toute couche horizontale de *mak*) qui donne l'altitude (float) des pixels. Pour chacun d'eux, le sommet des triangles du relief triangularisé est renseigné dans le fichier *f_MNT.dart*.

	Nature de la figure	3 points + Ω_n	Propriétés optiques		Type
Ligne du fichier	0 (triangle) ou 1 (parallélogramme) (*hu*)	12 (*float)*	C_1 (*hu*)	C_2 (*hu*)	(*hu*)

Tableau I.10: Le fichier figures.src contient le nombre total de figures suivi à chaque ligne de leurs caractéristiques respectives : nature de la figure (codée en hu), coordonnées (x,y,z) des 3 sommets + vecteur normal Ω_n (codés en float), propriétés optiques C_1 (type de diffusion) et C_2 (N° de fonction de transfert associée à C_1) qui font référence à une ligne de coeff_diff.src et indice du type d'élément (Mur, Toit, etc.) représenté.

Le fichier *maket.xml* contient la géométrie générale de la scène : taille des cellules (ΔX, ΔY, ΔZ), dimension de la maquette (DX, DY, DZ), dimension de la scène (si la maquette est une sous scène), présence éventuelle de murs autour de la maquette, *etc*.

Les éléments du paysage sont créés de manière séquentielle : (1) sol (*Sol*/*Sol_MNT*), (2) parcelles sans/avec MNT (*Plot_opaque*/ *Plot_MNT*) sans/avec végétation (*Plot*), (3) arbres distribués aléatoirement ou avec {fichier (x,y) + paramètres moyens de chaque type d'arbres} ou avec {fichier (x,y, paramètres exacts de chaque arbre)}, (4) routes, (5) eau (rivière, lac), (6) éléments urbains (maison, immeuble, *etc.*).

Le module optionnel ***Végétation*** crée un paysage avec des parcelles à partir d'une carte d'occupation du sol (Handbook, 2006). Ceci permet de simuler de grands paysages complexes.

- ***Dart***. Ce module simule le T-R du système "Terre-atmosphère", après un certain nombre de pré-calculs : trajets possibles des rayons depuis tous les centres des sous cellules et sous faces de la cellule (0,0,0), énergies thermiques émises par face de cellule turbide, pour tout type de feuille (LAD, ρ_f, τ_f, *etc.*) et pour une gamme discrète de u_f, stockage des vecteurs normaux des figures du MNT, Aire des intersections "cellules *vs*. figures", *etc*.

  Dart utilise le fichier d'entrée *dart.xml* et les fichiers crées par les 3 autres modules stockés dans "./output/" : *directions.dir*, *mak*, *figures.src*, *f_MNT.dart* (si relief), *coeff_diff.src* et *coeff_diff**q**.src*, atmosphere.src et *atmosphere**q**.src* et les fonctions de transfert stockées dans "./output/lib_phase/" : *ffol(j)_transm*, *ffol(j)_diff**q*** et *ffol(j)_spec**q***.

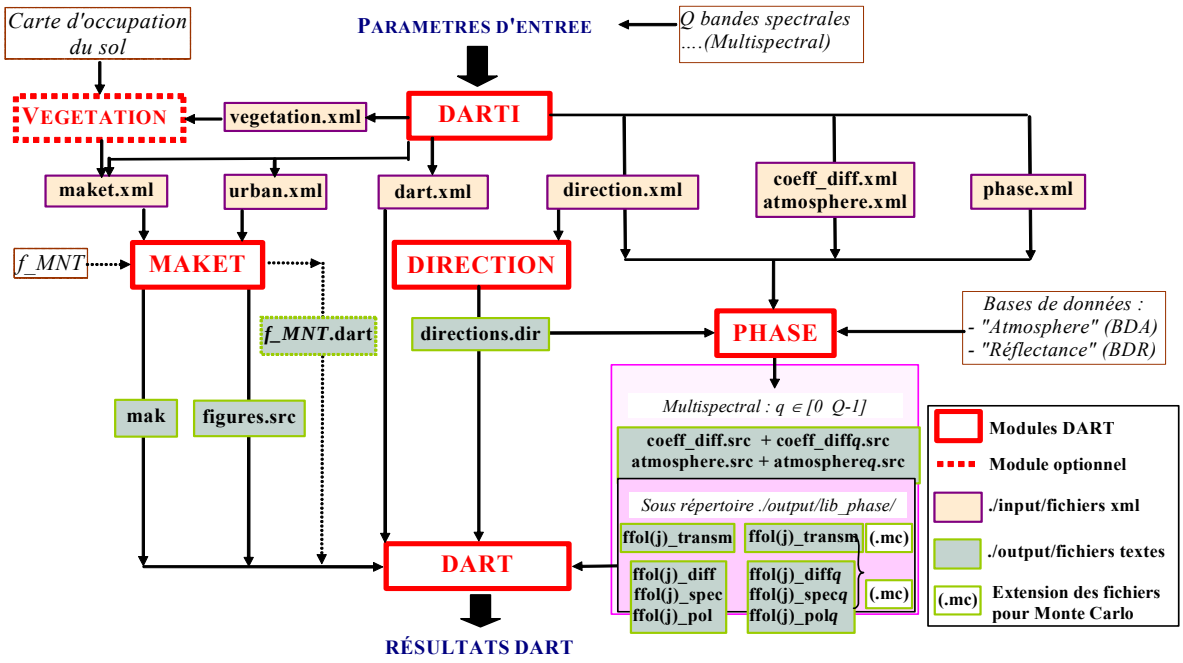


Figure I.39 : Modules de DART. Création et utilisation des fichiers (format xml) utilisés.

Le module *Dart* gère simultanément plusieurs bandes spectrales en ajoutant une dimension aux matrices de stockage d'énergie. L'intérêt du mode multispectral est double :

- Réduction des temps de calcul du trajet des rayons et de la position des barycentres d'émission ou de diffusion dans le module *DART*. En effet, ces quantités ne sont calculées qu'une seule fois, car elles ne dépendent pas de la longueur d'onde.
- Plus grande souplesse pour fixer les propriétés optiques des matériaux terrestres.

I.5.2 Etapes majeures d'une simulation

Toute simulation est réalisée en monospectral ou multispectral, avec ou sans T-R atmosphérique :

i) *Scène = "Paysage terrestre"* : l'opérateur spécifie l'éclairement du paysage terrestre en donnant :
- la distribution directionnelle de l'éclairement incident BOA $I_{BOA}(\Omega_v)$, ou bien
- la fraction du rayonnement diffus (isotrope) dans l'éclairement du paysage terrestre (SKYL).

ii) *Scène = "Atmosphère + Paysage terrestre"* : le rayonnement solaire TOA incident $W_{TOA}(\Omega_s)$ est simulé depuis le haut de l'atmosphère à travers les couches HA et AI. Le rayonnement BOA $W_{BOA}(\Omega_n)$ incident sur BA (*i.e.*, paysage terrestre) a 2 termes : rayonnements "solaire direct $W_{BOA,dir}(\Omega_s)$" (rayonnement transmis sans interception par l'atmosphère) + "diffus $W_{BOA,diff}(\Omega_n)$" (rayonnement transmis après interception et diffusion par l'atmosphère). On passe alors à l'étape 1.

Les étapes décrites ci-dessous sont similaires pour les modes "monospectral" et "multispectral". En multipectral, la spécification de 2 longueurs d'onde λ_1 et λ_2 fixe le mode (R, T ou R+T) associé à chaque bande spectrale q. Ainsi, avec $\lambda_{max}[q] < \lambda_1$ (multispectral), le mode associé au canal q est (R), si bien que *Dart* écrit une image de réflectance (FRD). Autrement, c'est une image de température de brillance (T_B).

La modélisation du T-R "Terre-Atmosphère" comprend 5 étapes majeures (Figure I.40, Figure I.41).

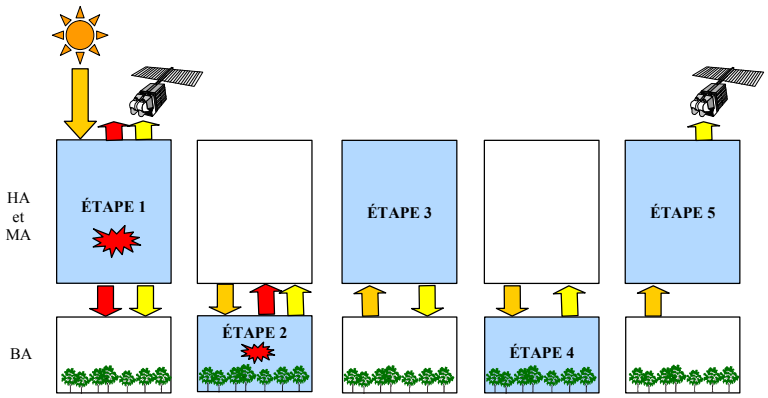


Figure I.40 : Principales étapes de la simulation du T.R. dans le système "Terre - Atmosphère". L'émission thermique du mode (T) est indiquée par le symbole dentelé rouge (étapes 1 et 2).

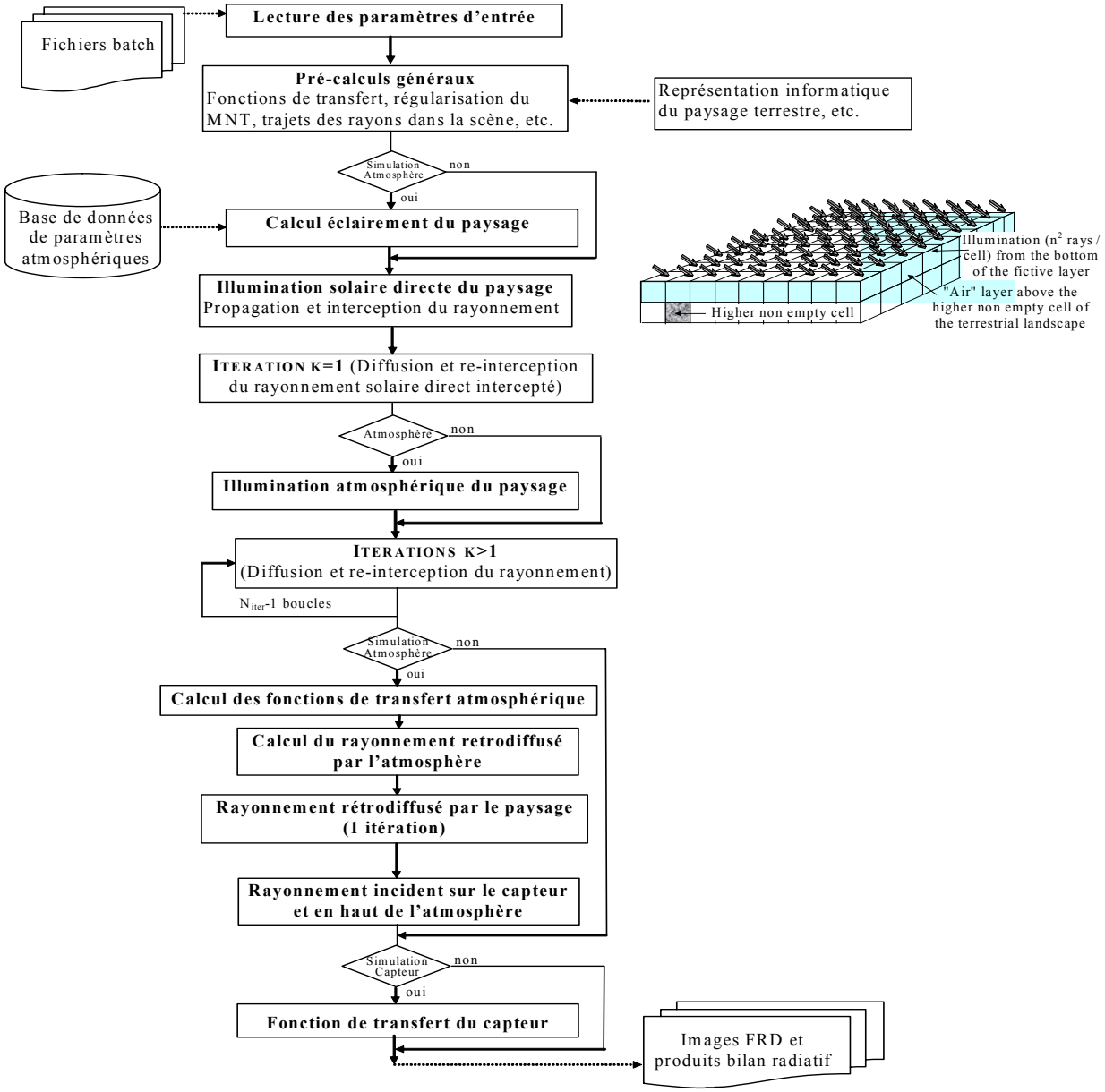


Figure I.41 : Diagramme du mode R monospectral.

• **Etape 1 : *Propagation d'un rayon solaire dans HA et MA + émission thermique (mode T)***.

Les diffusions des cellules *Air* jusqu'à l'ordre 3 (*i.e.*, 3 itérations) sont simulées pour calculer l'éclairement descendant directionnel {*i.e.* $E_{BOA}(\Omega_v)$} en haut de la couche BA (Figure I.40) ainsi que la réflectance atmosphérique due à MA et HA au niveau du capteur et en haut de l'atmosphère.

La simulation de l'émission thermique atmosphérique en mode (T) comprend les 3 étapes :

a) Émission de HA : une partie du rayonnement est interceptée par HA, une partie sort par le haut de HA, et une partie sort par le bas de HA.

b) Émission de MA : elle est interceptée dans MA ou HA ou atteint le haut de HA ou l'interface MA-BA.

c) Diffusion du rayonnement intercepté par HA et AI : calcul itératif qui s'arrête quand toute l'énergie est sortie par le haut de HA ou le bas de MA. Une quasi-convergence est atteinte en une seule itération (*i.e.*, diffusion d'ordre 1) dans l'infrarouge thermique, car l'atmosphère y diffuse peu.

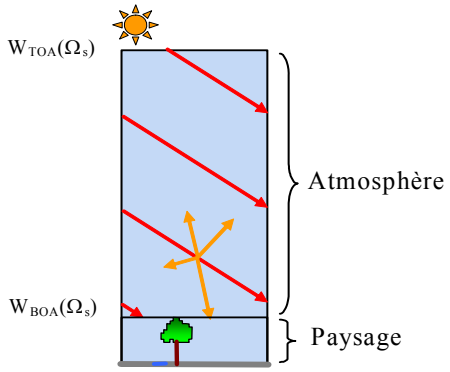


Figure I.42 : T-R atmosphérique pour calculer l'éclairement du paysage terrestre. Mode (R).

• **Etape 2 : *T-R dans le paysage terrestre et possiblement dans l'air (couche BA)***.

- *Illumination solaire directe du paysage (itération k=0)*

L'éclairement solaire direct $E_{S,BOA}(\Omega_s)$ de la maquette terrestre peut être spécifié de différentes manières (Figure I.44), selon qu'il y ait ou non la simulation du T-R atmosphérique. Il est simulé par 49 rayons parallèles $W_{BOA,dir}(\Omega_s)$ issus du bas de chaque cellule de la couche fictive juste au-dessus de la maquette (Figure I.43). Les rayons sont suivis dans la maquette tant que $W(\Omega_s) > T_1.W_{BOA,dir}(\Omega_s)$. L'énergie éliminée est stockée dans le fichier *report**q**.out*. L'énergie interceptée par les cellules est stockée cellule par cellule pour être en partie diffusée à l'itération k=1. La couche fictive en haut de BA qui stocke les rayons montants est sur-échantillonnée.

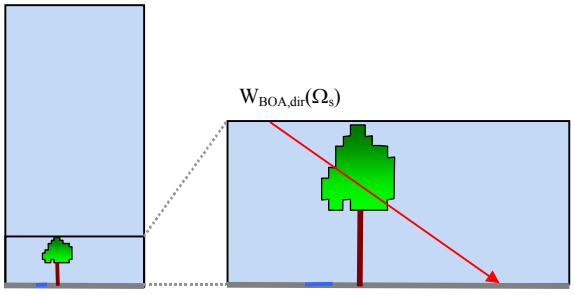
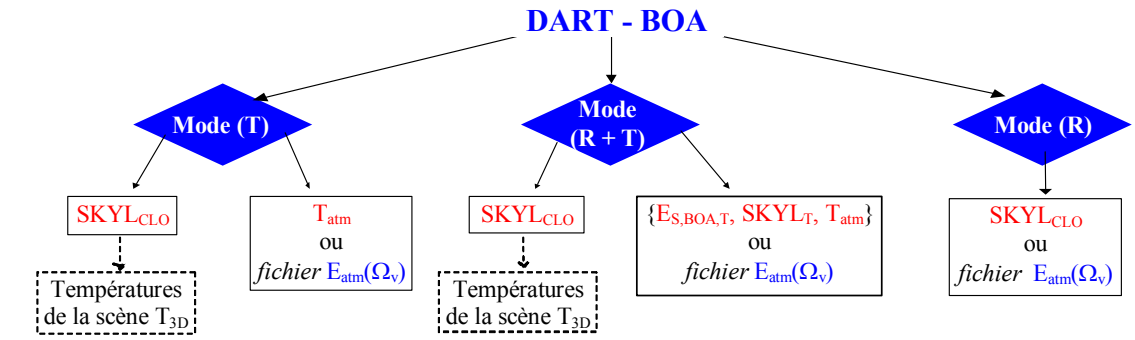
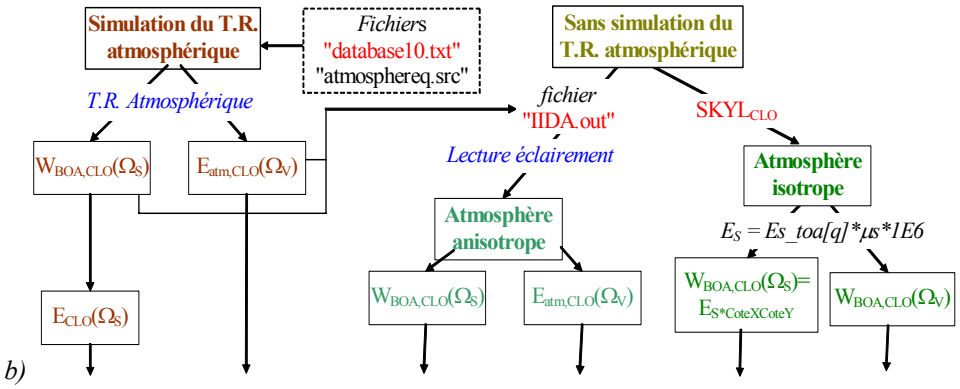


Figure I.43 : Schéma de l'illumination solaire directe du paysage.



a) **$SKYL_{CLO}$, $SKYL_T$** : % d'éclairement diffus pour les modes (R) et (T)
$E_{S,BOA,T}$: constante solaire au bas de l'atmosphère pour le mode (T).
$E_{atm}(\Omega_v)$: éclairement atmosphérique (*e.g.*, fichier *IIDAq.out* issu de simulation Dart du T.R. atmosphérique).



b)

Figure I.44. Eclairement atmosphérique. a) Mode monospectral sans T.R. atmosphérique. Les paramètres en rouge peuvent être directement saisis par l'utilisateur. b) Mode (R), avec / sans simulation du T.R. atmosphérique.

- *Diffusion d'ordre 1 (itération k=1)*

Toute cellule qui a intercepté de l'énergie à l'itération k=0, diffuse une part de cette énergie selon les directions possibles (Figure I.45). Tout rayon est suivi dans la maquette jusqu'à ce qu'il sorte par le haut de celle-ci, qu'il soit totalement intercepté ou que son énergie devienne $<T_2.<\Sigma W>_{1,2}.\frac{\Delta\Omega_n}{4\pi}$.

L'énergie interceptée cette diffusion est stockée par cellule pour être en partie diffusée à l'itération 2.

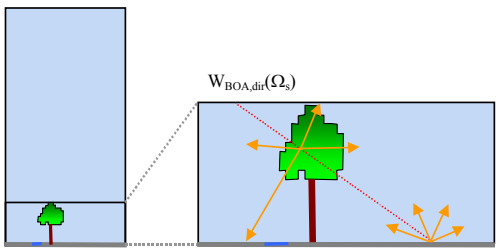


Figure I.45 : Schéma de l'itération k=1.

- *Illumination atmosphérique du paysage*

Les rayons atmosphériques $W_{BOA,diff}(\Omega_n)$ se propagent à partir du bas des cellules de la couche fictive, à raison d'un rayon pour chaque direction Ω_n descendante (*Figure I.46*).

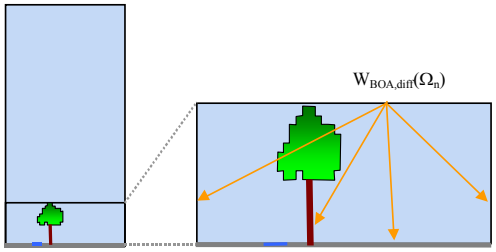


Figure I.46 :
Schéma de l'illumination atmosphérique du paysage.

- *Itération k>1*

Toute cellule qui a intercepté de l'énergie lors de l'itération k-1, en diffuse une partie dans les N_{dir} directions de propagation possibles (Figure I.47). Ce processus se réitère jusqu'à l'itération N_{iter} ou à une itération inférieure si la variation relative de l'albédo (mode R) ou de l'exitance (mode T) de la maquette du paysage est inférieure à un seuil T_3 défini par l'opérateur (*cf.* I.2.2). Tout rayon dont l'énergie devient inférieure à $T_2.<\Sigma W>_{1,2}.\frac{\Delta\Omega_n}{4\pi}$ est arrêté. La distribution 3-D de l'énergie absorbée et interceptée par le paysage terrestre est stockée. Ce résultat est utile pour l'étude des surfaces terrestres : activité photosynthétique, bilan d'énergie, *etc*.

Les rayons qui traversent selon une direction montante (Ω_v) un pixel (i,j) de la couche fictive BOA, de la couche qui englobe le capteur et de la couche TOA sont notés $W_{BOA}(i,j,\Omega_v)$, $W_{capteur}(i,j,\Omega_v)$ et $W_{TOA}(i,j,\Omega_v)$. Ils sont stockés pour constituer les images pour toutes les directions d'observation. L'opérateur donne l'altitude H_{capt} du capteur. Si le capteur est dans AI ou HA, H_{capt} est approché par l'altitude de la face supérieure ou inférieure la plus proche de la cellule *Air* qui contient le capteur.

Les termes $\{W_{BOA}(\Omega_v)=\Sigma_{ij} W_{BOA}(i,j,\Omega_v)\}$, $\{W_{capteur}(\Omega_v)=\Sigma_{ij} W_{capteur}(i,j,\Omega_v)\}$ et $\{W_{TOA}(\Omega_v)=\Sigma_{ij} W_{TOA}(i,j,\Omega_v)\}$ sont utilisées pour calculer les FRD (mode R) et températures (mode T) de brillance (T_B) à 3 niveaux : BOA, au niveau du capteur et TOA.

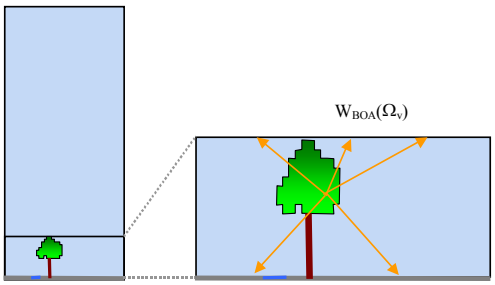


Figure I.47 :
Schéma de l'itération k>1.

- **Etape 3 :** ***Rétrodiffusion atmosphérique à partir du rayonnement montant issu de l'étape 2***.

L'atmosphère diffuse vers le paysage terrestre une partie du rayonnement lors de l'étape 2 Pour diminuer les temps de calcul, cette diffusion est calculée en convoluant l'énergie montante en haut de BA avec une fonction de transfert FT_{BA-BA} pré-calculée sans suréchantillonnage de la couche fictive en haut de BA. $FT_{BA-BA}(\Delta i,\Delta j,\Omega\uparrow,\Omega'\downarrow)$, où $\Delta i=i'-i$ et $\Delta j=j-j'$, donne l'énergie $W_{BOA}(i',j',\Omega'\downarrow)$

rétrodiffusée par l'atmosphère sur chaque pixel (i',j') du haut de BA selon toute direction descendante $\Omega'\downarrow$, due à un rayon montant unitaire $W_{BOA}(i,j,\Omega\uparrow)$ issu d'un pixel (i,j) de la couche de cellules supérieure de BA selon une direction montante $\Omega\uparrow$.

$$W_{BOA}(i', j', \Omega'\downarrow) = \Sigma_i.\Sigma_j.\Sigma_{\Omega\uparrow}.W_{BOA}(i, j, \Omega\uparrow) \,.\, FT_{BA\text{-}BA}(\Delta i, \Delta j, \Omega\uparrow, \Omega'\downarrow)$$

- **Etape 4 : *Propagation du rayonnement de couplage dans le paysage terrestre***.
  Réflexion par le paysage terrestre à partir du rayonnement incident calculé à l'étape 3.

- **Etape 5 : *Rayonnement mesuré par le capteur et en haut de l'atmosphère***.
  Cette étape calcule les flux reçus par le capteur et/ou en haut de l'atmosphère (Figure I.48), à partir des flux montants en haut de la couche BA et des fonctions de transfert $FT_{BA\text{-}Capteur}(\Delta i,\Delta j,\Omega\uparrow,\Omega'\uparrow)$ et $FT_{BA\text{-}TOA}(\Delta i,\Delta j,\Omega\uparrow,\Omega'\uparrow)$. La fonction $FT_{BA\text{-}TOA}(\Delta i,\Delta j,\Omega\uparrow,\Omega'\uparrow)$ donne le flux montant $W_{BOA}(i',j',\Omega\uparrow)$ selon toute direction montante $\Omega'\uparrow$ en tout pixel (i',j') à l'altitude du capteur, due à un rayon unité $W_{BOA}(i,j,\Omega\uparrow)$ issu du pixel ($i=i'-\Delta i$, $j=j'-\Delta j$) du haut de (BA) selon la direction montante $\Omega\uparrow$.

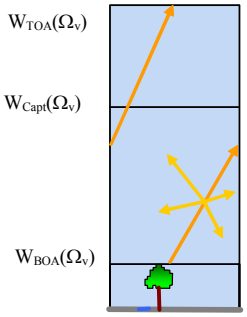


Figure I.48 : Schéma du rayonnement montant jusqu'au capteur et le haut de l'atmosphère.

Ainsi, on a :

$$W_{Capteur}(i', j', \Omega'\uparrow) = \Sigma_i.\Sigma_j.\Sigma_{\Omega\uparrow}.W_{BOA}(i, j, \Omega\uparrow) \,.\, FT_{BA\text{-}Capteur}(\Delta i, \Delta j, \Omega\uparrow)$$

$$W_{TOA}(i', j', \Omega'\uparrow) = \Sigma_i.\Sigma_j.\Sigma_{\Omega\uparrow}.W_{BOA}(i, j, \Omega\uparrow) \,.\, FT_{BA\text{-}TOA}(\Delta i, \Delta j, \Omega\uparrow)$$

Les fonctions de transfert $FT_{BA\text{-}BA}$, $FT_{BA\text{-}Capteur}$ et $FT_{BA\text{-}TOA}$ sont pré-calculées simultanément (Figure I.49) à partir d'un rayon d'énergie unité montant du sommet de BA, pour toutes les directions montantes. Les diffusions d'ordre 3 sont simulées (3 itérations). Pour améliorer leur précision, les couches horizontales (MA, capteur et TOA) sont sur-échantillonnées pour le rayonnement direct montant. Par contre, de manière à ne pas augmenter les temps de calcul pour une composante moins forte que le rayonnement direct, ces 3 couches ne sont pas sur-échantillonnées pour le rayonnement indirect. Ainsi, $FT_{BA\text{-}TOA}$ est décomposé en un scalaire (Dirac) pour le rayonnement montant direct (*i.e.*, $\Omega\uparrow = \Omega'\uparrow$) et une matrice $FT_{BA\text{-}TOA,diffus}$ pour le rayonnement montant diffus. Les rayons montants $W_{TOA}(i, j, \Omega_v)$ et $W_{capt}(i, j, \Omega_v)$ forment les images FRD ou T_B.

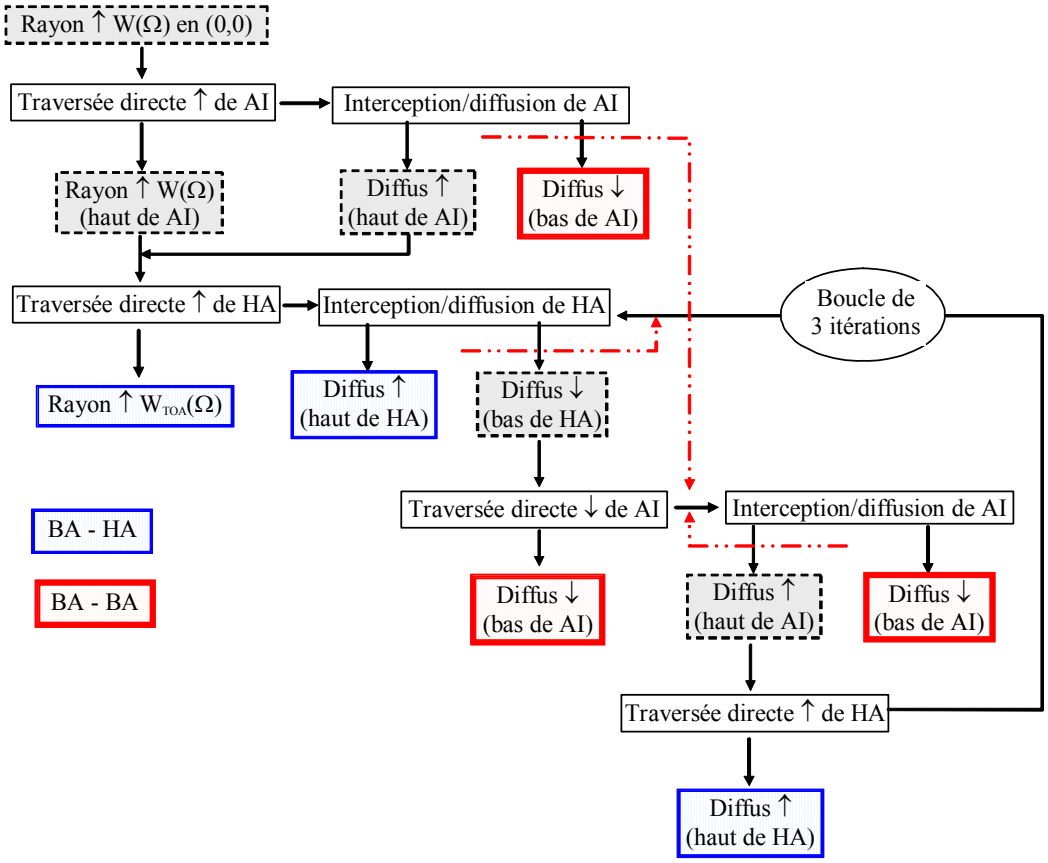
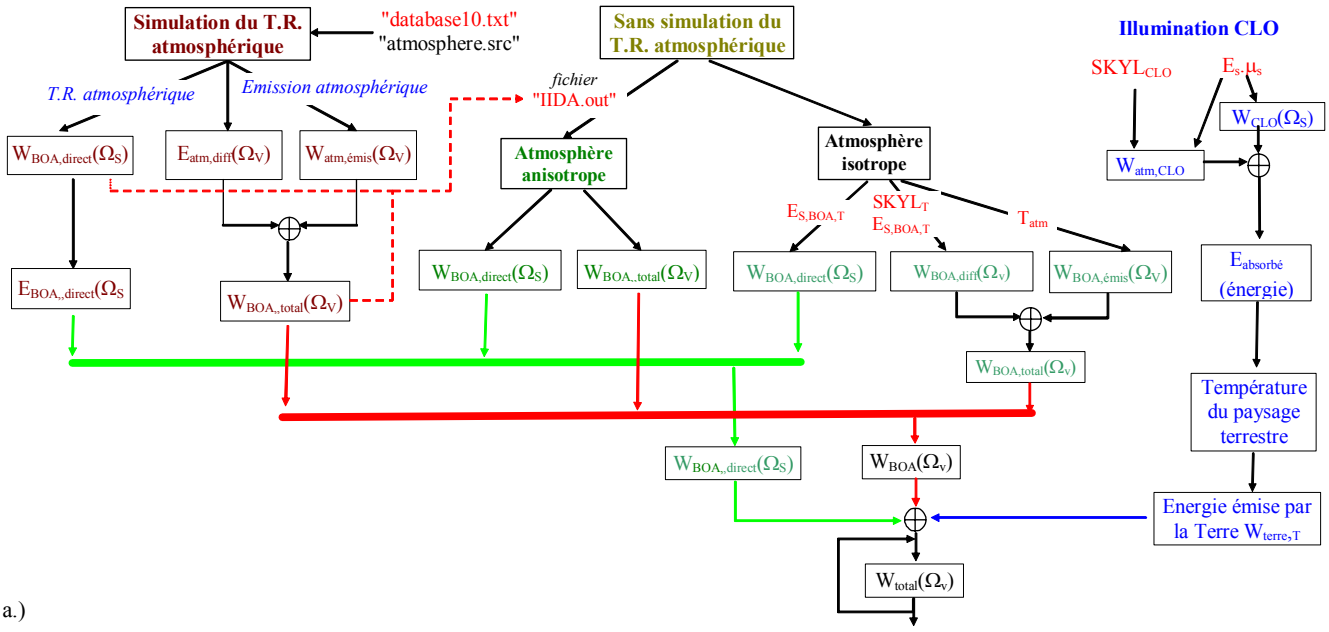


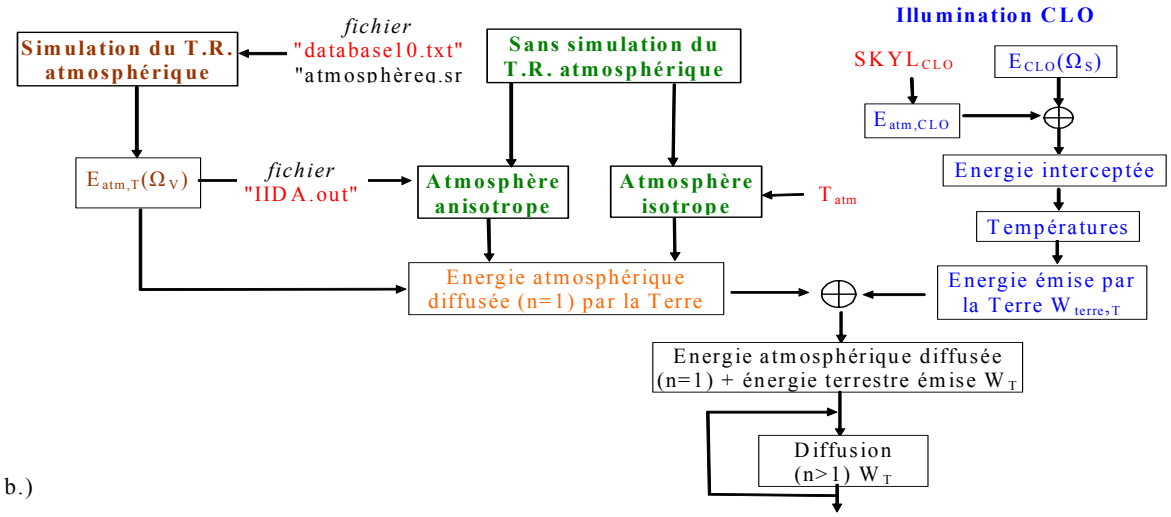
Figure I.49 : Calcul des fonctions de transfert $FT_{BA\text{-}BA}$ et $FT_{BA\text{-}TOA}$.

I.5.3 Mode (T)

Comme le mode (R), le mode (T) peut fonctionner en monospectral (Figure I.50) ou multispectral, sans simulation ou avec simulation du T-R atmosphérique. La Figure I.50.b illustre le cas "sans simulation atmosphérique". La Figure I.51 donne l'algorithme général du mode (T).



a.)



b.)

Figure I.50 : Simulation DART en mode (T), sans (a) et avec (b) éclairement solaire.

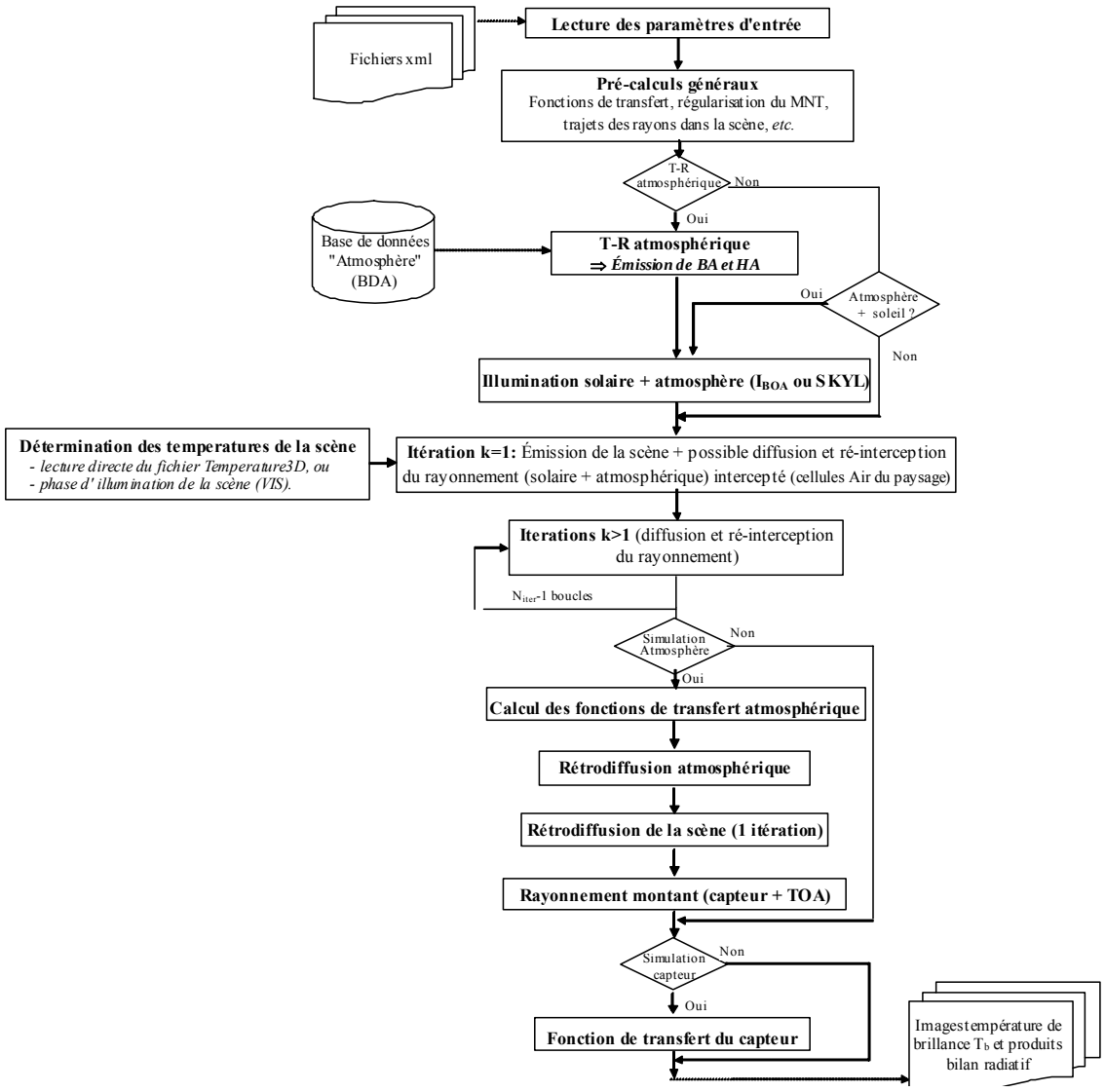


Figure I.51 : Algorithme du mode (T) de DART monospectral.

I.5.4 Produits DART atmosphériques en mode (R)

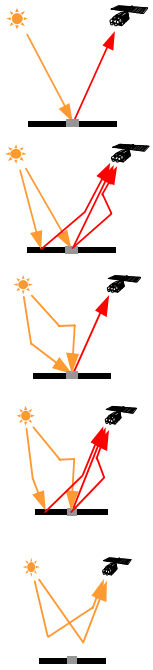
- ***Mode standard***

  - distribution verticale du rayonnement absorbé par l'atmosphère (fAR_{ATM}).
  - FRD (images directionnelles et leurs moyennes) en haut de l'atmosphère ($\rho_{tot,TOA}$) et au niveau supérieur de la cellule où se trouve le capteur ($\rho_{tot,capt}$).

- ***Mode non standard***

  Divers produits (images et moyennes) peuvent être simulés, à raison d'un produit par simulation. Les produits "moyennes" sont stockés dans un fichier "brf" du répertoire "TOA".

  - $\rho_{direct\text{-}direct,\ capt}$ et $\rho_{direct\text{-}direct,\ TOA}$: Réflectance "direct-direct" due au rayonnement qui est réfléchi par le paysage terrestre et remonte vers le capteur ou le haut de l'atmosphère sans être diffusé par l'atmosphère.
  - $\rho_{direct\text{-}tot,\ capt}$ et $\rho_{direct\text{-}tot,\ TOA}$: réflectance "direct-total" due au rayonnement qui atteint le paysage terrestre sans être diffusé et qui atteint capteur ou le haut de l'atmosphère de manière directe ou diffuse.
  - $\rho_{diffus\text{-}direct,\ capt}$ et $\rho_{diffus\text{-}direct,\ TOA}$: réflectance "diffus-direct" due au rayonnement qui après être réfléchi par le paysage terrestre atteint le capteur ou le haut de l'atmosphère sans diffusion atmosphérique.
  - $\rho_{diffus\text{-}tot,\ capt}$ et $\rho_{diffus\text{-}tot,\ TOA}$: réflectance "diffus-total" due au rayonnement solaire (diffus) qui atteint le paysage terrestre après avoir été diffusé par l'atmosphère et qui atteint ensuite le capteur ou le haut de l'atmosphère de manière directe ou diffuse.
  - $\rho_{atm,\ capt}$ et $\rho_{atm,\ TOA}$: réflectance "atmosphérique" due au rayonnement qui est diffusé par les composants de l'atmosphère vers le capteur ou le haut de l'atmosphère sans avoir atteint le paysage terrestre.



La simulation du T-R atmosphérique (modes R et T) peut donner pour toute bande spectrale *q* :

- *Profil_absorption**q***. Energie absorbée dans toute couche de BA, AI et HA. Unité : W/m (λ).
- *Prop_atmo**q***. Coefficients d'extinction $\{C_1, C_2, C_3, C_4\}$ de toute couche atmosphérique : C_1*1.2.10^9 (diffusion gazeuse: *short unsigned int*), C_2*1.25.10^7 (diffusion des aérosols: *short unsigned int*), C_3 (absorption gazeuse: *float*), C_4 (absorption des aerosols: *float*). Unité : m^{-1}. Dans le cas de la simulation du T-R dans les cellules *Air* de la couche BA, le fichier *Prop_atmoBA**q*** donne les coordinées i, j, k de chaque cellule "Air" et les coefficients $\{C_1, C_2, C_3, C_4\}$ associés.
- *IIDA**q**.out*. Eclairement descendant BOA de la scène, sans couplage atmosphérique. Unité : $W.m^{-2}$ (surface horizontale).$sr^{-1}.m^{-1}$ (λ).
- *IID**q**.out*. Eclairement descendant BOA de la scène. Unité : $W.m^{-2}$ (surface horizontale).$sr^{-1}.m^{-1}$ (λ).
- *IIDASensor**q**.out*. Eclairement descendant du capteur, sans couplage atmosphérique. Unité : $W.m^{-2}$ (surface horizontale).$sr^{-1}.m^{-1}$ (λ).
- *IIDSensor**q**.out*. Eclairement descendant du capteur. Unité : $W.m^{-2}$ (surface horizontale).$sr^{-1}.m^{-1}$ (λ).

- *FT_abs_AItoHA*. Energie moyenne absorbée d'un rayon qui traverse HA en montant. La moyenne est sur toutes les directions montantes, avec un rayon initial d'énergie unité.

Le fichier *report**q**.out* stocke certaines propriétés optiques de l'atmosphère (Tableau I.11). La transmittance gazeuse verticale est un paramètre d'entrée ou est calculée à partir d'une base de données pour la bande spectrale considérée. Les différents produits albédos et éclairement n'ont de sens que pour les longueurs d'ondes inférieures à la longueur d'onde qui sépare les modes "R" et "R+T".

Paramètres	Description
$T_{m\ BOA\text{-}TOA}$	Transmittance gazeuse totale de l'atmosphère
$T_{m\ BOA\text{-}capt}$	Transmittance gazeuse du chemin vertical entre le sol et le capteur
$E_{dir,TOA}$	Éclairement direct TOA (W/m^2)
$E_{direct,BOA}$	Éclairement direct BOA (W/m^2)
$E_{diffus,BOA}$	Éclairement diffus atmosphérique BOA (W/m^2)
$E_{couplage,BOA}$	Éclairement de couplage BOA (W/m^2)
$E_{direct,capt}$	Éclairement direct au niveau du capteur (W/m^2)
$E_{diffus,capt}$	Éclairement diffus atmosphérique au niveau du capteur (W/m^2)
$\rho_{hh,BOA}$	Albédo BOA
$\rho_{hh,\ CAPT}$	Albédo au niveau du capteur
$\rho_{hh,\ TOA}$	Albédo TOA
s_{ATM}	Albédo atmosphérique

Tableau I.11: *Paramètres atmosphériques calculés par DART stockés dans le fichier report**q**.out*.

I.5.5 Produits atmosphériques en mode T ou "R + T"

- ***Mode standard***

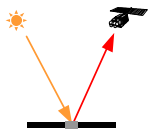
  - Profil vertical du % de rayonnement incident absorbé (fAR_{ATM}) par toute couche atmosphérique.

  - T_B (images directionnelles et valeurs moyennes des températures de brillance) respectivement au sommet de l'atmosphère ($T_{B,tot,TOA}$) et au niveau du capteur ($T_{B,tot,capt}$). Pour le capteur, les quantités recueillies sont en fait les quantités recueillies au sommet de la cellule où il se trouve.

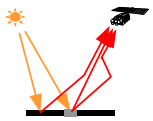
- ***Mode non standard***

  Divers produits (images et moyennes) peuvent être simulés, à raison d'un produit par simulation. Les produits associés au rayonnement solaire ne sont possibles que pour le mode "R + T". Les produits "moyennes" sont stockés dans un fichier "T_{app}" du répertoire TOA.

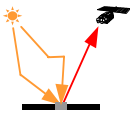
  - $T_{B\text{-}direct,capt}$ et $T_{B\text{-}direct,TOA}$: Température de brillance due au rayonnement "émission + réflexion du rayonnement solaire direct (R + T)" issu du paysage terrestre et qui remonte vers le capteur ou le haut de l'atmosphère sans être diffusé par l'atmosphère.



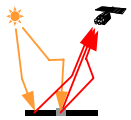
  - $T_{B\text{-}tot,capt}$ et $T_{B\text{-}tot,TOA}$: Température de brillance due au rayonnement "émission + réflexion du rayonnement solaire direct (R + T)" issu du paysage terrestre et qui atteint le capteur ou le haut de l'atmosphère de manière directe ou diffuse.



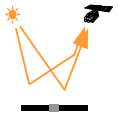
- $T_{B\text{-diffus-direct,capt}}$ et $T_{B\text{-diffus-direct,TOA}}$: Température de brillance due au rayonnement "émission + réflexion de l'émission atmosphérique + réflexion du rayonnement solaire diffus (R + T)" issu du paysage terrestre et qui atteint le capteur ou le haut de l'atmosphère sans diffusion atmosphérique.



- $T_{B\text{-diffus-tot,capt}}$ et $T_{B\text{-diffus-tot,TOA}}$: Température de brillance due au rayonnement "émission + réflexion de l'émission atmosphérique + réflexion du rayonnement solaire diffus (R et T)" issu du paysage terrestre et qui atteint le capteur ou le haut de l'atmosphère de manière directe ou diffuse.



- $T_{B\text{-atm,capt}}$ et $T_{B\text{-atm,TOA}}$: Température de brillance "atmosphérique" due au rayonnement qui est émis et diffusé par les composants de l'atmosphère vers le capteur ou le haut de l'atmosphère sans avoir atteint le paysage terrestre.



I.5.6 Produits de DART

DART fournit 3 types de produits : "FRD / T_B", "Bilan radiatif" et "Indice foliaire".

● Produits "FRD et T_B"

TYPE	PRODUITS SELECTIONNABLES	OPTIONS
FRD / T_B	Image FRD / T_B	• TOA • BOA • Simulation du capteur • Extrapolation • Toutes les itérations • Fonction de transfert du capteur • Composante du FRD selon les trajets atmosphériques (cf. § IV)
	{FRD + albédo} ou $T_B(\Omega_v)$	
	FRD ou $T_B(\Omega_v)$ et images {FRD ou $T_B(\Omega_v)$} uniquement dues à la contribution des arbres, du sol et/ou de l'herbe.	
	Image FRD du rayonnement polarisée	

Tableau I.12 : Produits facteur de réflectance (FRD) / température de brillance (T_B) directionnels.

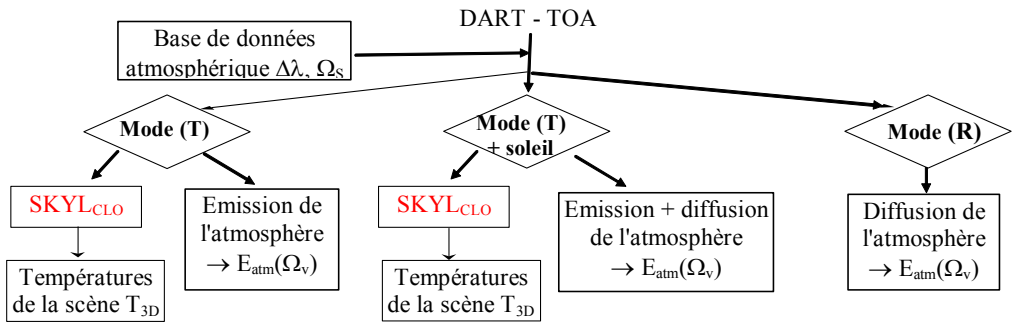


Figure I.52: Produits de {DART monospectral + T.R. atmosphérique. Modes (R) et (T)}.

Les produits "FRD / T_B" (Tableau I.12, Figure I.52) sont des "FRD / $T_B(\Omega_v)$" et des images FRD. Ils sont fournis à 3 niveaux : bas de l'atmosphère (BOA : *Bottom Of the Atmosphere*), haut de l'atmosphère (TOA : *Top Of the Atmosphere*) et capteur radiométrique. DART propose en option le FRD associé au rayonnement polarisé (Pinel, 1997) ainsi que le rayonnement diffusé et/ou émis en dernier par le feuillage des arbres, le sol ou la couche homogène de végétation. Les produits "FRD/T_B" peuvent être donnés à

chaque itération (1 à N_{iter}) et à une itération dite infinie, à l'aide d'une extrapolation exponentielle des résultats des trois dernières itérations. En mode "T" ou {"R + T" avec $\lambda_{min}[q] > \lambda_2$}, la température de brillance est calculée en appliquant la loi de Planck inverse sur la luminance spectrale directionnelle.

		Mode R	Mode T
Monospectral : Q = 1	BOA	$FRD_{BOA}(\Omega_s,\Omega_v)=\frac{\pi}{\mu_v.\Delta\Omega_v}.\frac{\Sigma_{ij} W_{BOA}(i,j,\Omega_v)}{W_{dir,BOA}+\sum_n W_{diff,BOA}(\Omega_n)}$	$L_{BOA}(\Omega_s,\Omega_v)=\frac{\Sigma_{ij} W_{BOA}(i,j,\Omega_v)}{\mu_v.\Delta\Omega_v\ \Delta X.\Delta Y}$
	Capteur	$FRD_{capteur}(\Omega_s,\Omega_v)=\frac{\pi}{\mu_v.\Delta\Omega_v}.\frac{\Sigma_{ij} W_{capt}(i,j,\Omega_v)}{W_{dir,BOA}+\sum_n W_{diff,capt}(\Omega_n)}$	$L_{capteur}(\Omega_s,\Omega_v)=\frac{\Sigma_{ij} W_{capt}(i,j,\Omega_v)}{\mu_v.\Delta\Omega_v\ \Delta X.\Delta Y}$
	TOA	$FRD_{TOA}(\Omega_s,\Omega_v)=\frac{\pi}{\mu_v.\Delta\Omega_v}.\frac{\Sigma_{ij} W_{TOA}(i,j,\Omega_v)}{W_{dir,TOA}}$	$L_{TOA}(\Omega_s,\Omega_v)=\frac{\Sigma_{ij} W_{TOA}(i,j,\Omega_v)}{\mu_v.\Delta\Omega_v\ \Delta X.\Delta Y}$
Multispectral : Q ≥ 1	BOA	$FRD_{BOA,q}(\Omega_s,\Omega_v)=\frac{\pi}{\mu_v.\Delta\Omega_v}.\frac{\Sigma_{ij} W_{BOA,q}(i,j,\Omega_v)}{W_{dir,BOA,q}+\sum_n W_{diff,BOA}(\Omega_n)}$	$L_{BOA,q}(\Omega_s,\Omega_v)=\frac{\Sigma_{ij} W_{BOA}(i,j,\Omega_v)}{\mu_v.\Delta\Omega_v\ \Delta X.\Delta Y}$
	Capteur	$FRD_{capt,q}(\Omega_s,\Omega_v)=\frac{\pi}{\mu_v.\Delta\Omega_v}.\frac{\Sigma_{ij} W_{capt,q}(i,j,\Omega_v)}{W_{dir,BOA,q}+\sum_n W_{diff,capt,q}(\Omega_n)}$	$L_{capt,q}(\Omega_s,\Omega_v)=\frac{\Sigma_{ij} W_{capt,q}(i,j,\Omega_v)}{\mu_v.\Delta\Omega_v\ \Delta X.\Delta Y}$
	TOA	$FRD_{TOA,q}(\Omega_s,\Omega_v)=\frac{\pi}{\mu_v.\Delta\Omega_v}.\frac{\Sigma_{ij} W_{TOA,q}(i,j,\Omega_v)}{W_{dir,TOA,q}}$	$L_{TOA,q}(\Omega_s,\Omega_v)=\frac{\Sigma_{ij} W_{TOA,q}(i,j,\Omega_v)}{\mu_v.\Delta\Omega_v\ \Delta X.\Delta Y}$

Tableau I.13: Produits DART

$$FRD_{BOA}(\Omega_s,\Omega_v)=\pi.\frac{L_{BOA}(\Omega_v)}{E_{BOA}} \qquad T_{B,BOA}(\Omega_s,\Omega_v)=\frac{h.c}{k.\lambda_o}.\{\ln[1+\frac{2.h.c}{\lambda_o^5.L_{BOA}(i,j,\Omega_v)}]\}^{-1}$$

$$\text{où } L_{BOA}(\Omega_v)=\frac{\Sigma_{ij} W_{BOA}(i,j,\Omega_v)}{\Delta X.\Delta Y.\mu_v.\Delta\Omega_v} \qquad \text{et } E_{BOA}=\frac{W_{dir,BOA}+\Sigma_n W_{diff,BOA}(\Omega_n)}{\Delta X.\Delta Y}$$

DART peut donner des images projetées dans le plan du capteur. Il peut aussi calculer les composantes (ρ_{atm}, $\rho_{direct\text{-}direct}$, *etc.*) des images au niveau du capteur et au sommet de l'atmosphère.

Note: DART stocke chaque image dans un fichier spécifique. Pour la simulation avec T-R atmosphérique, les images TOA et au niveau du capteur sont aussi stockées dans un fichier ASCII (*refto*. Les réflectances moyennes sont alors stockées dans le fichier *reftom*.

- Produits "Bilan radiatif"

Mode R : les produits bilan radiatif (Tableau I.14) sont :

- Fraction de flux incident 3-D (fIR): $\frac{\text{énergie} \downarrow \text{(Watts) sur face sup. de cellule}}{\text{énergie} \downarrow \text{/ cellule du paysage terrestre}}$ (0 si cellule vide)
- Fraction de flux absorbé 3-D (fAR): $\frac{\text{énergie absorbée (Watts) / cellule}}{\text{énergie} \downarrow \text{/ cellule du paysage terrestre}}$ (0 si cellule vide)
- Fraction de flux diffusé 3-D (fSR): $\frac{\text{énergie (Watts) diffusée / cellule}}{\text{énergie} \downarrow \text{/ cellule du paysage terrestre}}$ (0 si cellule vide)

◆ Fraction de flux intercepté 3-D (fInt): $\frac{\text{énergie (Watts) interceptée / cellule}}{\text{énergie} \downarrow \text{/ cellule du paysage terrestre}}$ (0 si cellule vide)

◆ Profils verticaux 1D fIR, fAR, fSR et fIntR : $\frac{\Sigma \text{ f}\ldots. \text{ des cellules non vides d'une couche}}{\text{Nombre de cellules (vide + pleine) par couche}}$

Dans le visible (450 - 700nm): fAR = fAPAR (*fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation*).

A l'itération 0, les produits fInt et fI correspondent au rayonnement solaire direct intercepté et incident.

Mode T : fIR, fAR, fSR, fIntR sont des énergies spectrales ($W.m^{-1}$) divisées par l'aire (m^2) de la face supérieure des cellules. A l'itération 0, fInt et fI correspondent au rayonnement "solaire direct + atmosphère" intercepté et incident. A l'itération 1, SR est l'émission thermique de chaque cellule avec en plus une éventuelle diffusion d'ordre 1 du rayonnement solaire direct si le mode est "R + T".

Dans le mode T pur, l'énergie totale absorbée est : fInt X – (fSR X – fSR 1)

TYPE	PRODUIT	MODE (R)	MODE (T)
Bilan Radiatif	Profils verticaux: fIR, fAR, fSR, fIntR (4 fichiers texte) / itération	sans unité	$W.m^{-2}.m^{-1}$
	Matrices 3D de fIR, fAR, fSR, fIntR (4 fichiers texte) / itération		
	Eclairement spectral atmosphérique BOA	$W.m^{-2}.sr^{-1}.m^{-1}$	
	Profil vertical du fAR_{ATM} dans l'atmosphère	sans unité	

Tableau I.14: Produits "bilan radiatif". (I: incident. A: absorbé. S: diffusé (scattered) (émis en mode T à l'itération 1). Int: intercepté. L'extrapolation (exponentielle spécifique à chaque cellule) des produits fIR, fAR, fSR, fIntR est optionnelle.

● Produits "Indice foliaire"

DART calcule deux produits "indice foliaire" (m^2 de feuillage par m^2 de sol) à partir de la maquette informatique du paysage terrestre (fichier *mak* c*f*. Figure I.1) :

- Distribution 3-D du LAI : matrice 3D de l'indice foliaire pour chaque cellule de la maquette.
- Distribution 1-D du LAI.

PRODUIT
Nombre de cellules non vides / couche + nombre de cellules / couche
Profil vertical du LAI
Matrice 3D du LAI

Tableau I.15

Ensemble des produits "indice foliaire".

II TESTS DE VALIDATION ET COMPARAISONS

II TESTS DE VALIDATION ET COMPARAISONS 81
II.1 Introduction 82
II.2 Rayonnement solaire reflechi 82
II.2.1 Présentation 82
II.2.2 Détection des imprécisions 84
II.2.3 Imprécisions barycentriques 89
II.2.4 Imprécisions de la représentation des diffusions multiples 92
II.2.5 Solutions retenues 94
II.2.6 Validation des améliorations 95
II.3 Émission thermique 97
II.3.1 Présentation 97
II.3.2 Milieu "sol + végétation" isotherme 97
II.3.3 Milieu "sol + végétation" non isotherme 103
II.4 Conclusion partielle 105

II.1 INTRODUCTION

Ce chapitre présente différents tests de validation du modèle DART, pour ce qui est des améliorations apportées sur la modélisation de la diffusion (mode R) et de l'émission (mode T) des milieux turbides.

En "mode R", les tests effectués ont permis d'évaluer la sensibilité des simulations DART à une approximation majeure du modèle, concernant la modélisation des diffusions multiples. De plus, l'impact de la variation de la dimension verticale des cellules (Δz) a aussi été étudié. En effet, la possibilité que les dimensions verticales et horizontales des cellules puissent différer au sein d'une même scène est très utile pour simuler les grands paysages observés par télédétection. Le fait de rendre possible les simulations DART avec des cellules non cubiques a impliqué des modifications sur l'ensemble du code. En effet, les composantes des vecteurs directeurs, associés à chaque direction discrète, doivent être parfaitement indépendantes de la dimension des cellules. En "mode T", le travail réalisé a eu pour but de valider l'approche de modélisation implantée.

Pour faciliter l'analyse des résultats, le milieu d'étude est simulé en tant que milieu turbide sans atmosphère avec un éclairement monodirectionnel (*i.e.* avec une proportion nulle d'éclairement diffus : SKYL = 0). Ceci permet d'éviter la présence d'éléments structuraux (*e.g.* tronc, branches, amas de feuilles), qui du fait de leurs mécanismes de réflexion et d'émission compliquent notre analyse. De même, un rayonnement diffus incident génère des diffusions qui peuvent masquer une modélisation erronée des diffusions multiples.

II.2 RAYONNEMENT SOLAIRE REFLECHI

II.2.1 Présentation

Depuis le développement de DART, le soucis d'obtenir un modèle à la fois performant et précis a conduit à effectuer régulièrement des tests comparatifs avec des mesures (Gastellu-Etchegorry et al., 1999b; Guillevic, 1999; Malenovsky, Martin et al., 2006) et avec d'autres modèles (Pinty et al., 2001). Ainsi, dans le cadre de la première expérience RAMI (RAdiative transfer Model Intercomparison), la comparaison de DART à trois autres modèles 3-D de transfert radiatif (T-R) a révélé, pour une scène caractérisée par une hétérogénéité structurale et un LAD sphérique, plusieurs différences dans le proche-infrarouge (Pinty et al., 2001). Ces dernières se sont avérées résulter de simplifications utilisées par DART pour optimiser ses temps d'exécution. Trois améliorations ont permis de diminuer ces différences sans augmenter les temps de calcul (Gascon, 2001; Gastellu-Etchegorry et al., 2004). Elles concernaient :

- L'introduction de deux barycentres énergétiques pour calculer la diffusion d'ordre 1 selon les directions montante $M_{s\uparrow}$ et descendante $M_{s\downarrow}$, dans le cas de cellules "turbides".

- Une amélioration du trajet des rayons diffusés par des cellules "turbides", en considérant les deux nœuds d'une grille d'échantillonnage de la cellule qui sont les plus proches de $M_{s\uparrow}$ ou $M_{s\downarrow}$.
- Une modélisation plus précise des diffusions multiples par le biais de la prise en compte de la distribution directionnelle du rayonnement intercepté, à partir d'un nombre de secteurs angulaires N_{sect} non ajustable, fixé à 6.

Ces améliorations ont été implantées sur la version 2001 de DART et dans la version multispectrale, nommée DARTv2003. Depuis, d'autres études ont été menées sur des scènes homogènes et hétérogènes pour estimer la précision de la modélisation des mécanismes de diffusions multiples. Ces travaux ont montré (1) une surestimation des diffusions multiples, particulièrement pour les directions de rétrodiffusions d'un milieu homogène planophile (Martin et al., 2003) et/ou hétérogène (RAMI-2: Pinty et al., 2004) et (2) des écarts par rapport à la réciprocité (Leroy, 2001) de la réflectance (Andral; 2001; Collet, 2004). De plus, dans le cadre de la nouvelle expérience RAMI-3 lancée en 2005 (http://rami-benchmark.jrc.it/HTML/RAMI3/RAMI3.html), certaines simulations réalisées sur des scènes turbides théoriques anisotropes (*i.e.*, LAD planophile et extrémophile) n'ont pas assuré la conservation de l'énergie radiative dans la maquette. Ces imprécisions observées, surtout dans le domaine spectral du proche-infrarouge (PIR), ont conduit à une nouvelle analyse approfondie des approximations utilisées pour modéliser le T-R au sein des cellules turbides.
Pour cela, des simulations réalisées par DARTv2003 ont été comparées aux simulations de deux autres modèles T-R de référence : (1) un modèle 1-D nommé "SAIL" (Gastellu-Etchegorry et al., 1996b) adapté du modèle SAIL (Verhoef, 1984), (2) et un modèle 3-D nommé DARTMC (Deschard, 2003) qui modélise la propagation du rayonnement dans la même représentation du paysage que DART, mais avec une méthode dite de "suivi de photons" basée sur l'approche de Monte Carlo. Le nombre de paramètres testés (angle zénithal solaire, différentes propriétés optiques, géométriques et structurales) a été défini pour :

- identifier des erreurs concernant la modélisation des diffusions et notamment selon la direction de rétro-illumination et,
- valider la propagation du rayonnement au sein d'une matrice de cellules turbides non parallélépipédiques.

Cette étude comparative est facilitée par le fait que les modèles SAIL et DART utilisent la même approche pour modéliser le phénomène de *hot spot* (Kuusk, 1991), éliminant ainsi une cause possible de différences. Les simulations DART ont été réalisées pour différentes hauteurs de cellules. Nonobstant l'intérêt majeur d'un modèle T-R 1-D comme SAIL *i.e.*, rapidité et précision des calculs du facteur de réflectance directionnelle (FRD) visible d'un couvert théorique (*i.e.* turbide homogène), un inconvénient majeur est d'assumer l'isotropie du rayonnement diffus. Cette hypothèse est d'autant plus erronée dans le

PIR, que les diffuseurs ne sont pas horizontaux. Cette contrainte théorique souligne l'intérêt du modèle DARTMC : il permet notamment d'évaluer la précision de la modélisation des diffusions multiples de DART, tout en s'affranchissant de la limitation principale du modèle SAIL. En effet, l'approche de DARTMC (*i.e.* "suivi de photons" combiné à la méthode de Monte Carlo) revient à simuler les diffusions multiples comme une succession de mécanismes d'ordre 1. Elle n'emploie donc aucune hypothèse simplificatrice sur les points de rediffusion (*i.e.* diffusion par le sous-centre le plus proche) ainsi que sur la direction du rayonnement incident qui est diffusé. Toute interaction "photon - matière" (*e.g.* interception, absorption, diffusion) est modélisée par une approche statistique à partir des fonctions de phase $T(\Omega_s,\Omega_v)$ et du facteur de transmission $T(\Delta l_i,\Omega_n)$. Toutefois, l'obtention d'un facteur de réflectance statistiquement fiable nécessite de lancer un très grand nombre de photons, entraînant des temps de calcul relativement longs. Cette contrainte explique que l'utilité première du modèle DARTMC est de servir de modèle de référence, notamment dans le PIR, pour juger de la pertinence des résultats générés par DART.

II.2.2 Détection des imprécisions

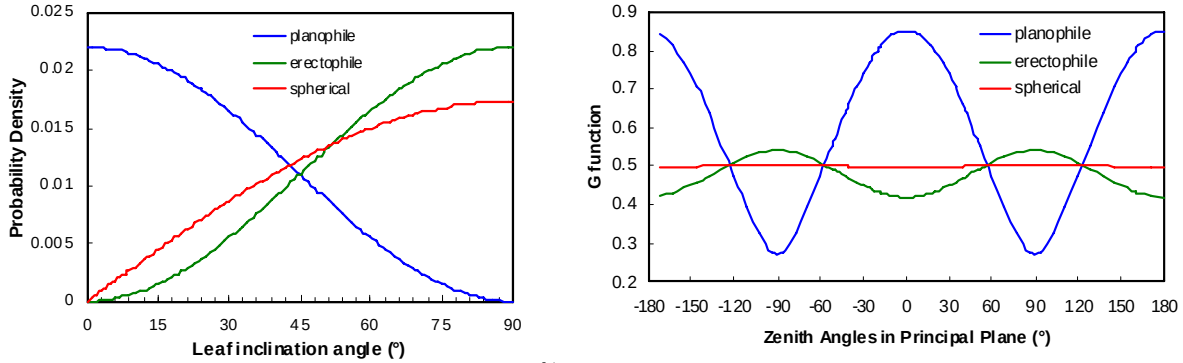
Les simulations sont réalisées pour des scènes homogènes, composées d'une surface horizontale de sol nu lambertien recouverte d'une couche de végétation. Il est considéré deux angles zénithaux solaires (θ_s = 20° et 50°), plusieurs dimensions de cellules, plusieurs distributions des normales foliaires (LAD : sphérique, érectophile, planophile), plusieurs densités volumiques foliaires u_f, et deux domaines spectraux : rouge (R) et proche-infrarouge (PIR). L'espace de propagation est discrétisé par 209 directions (Ω, $\Delta\Omega$) avec un sur-échantillonnage du *hot spot* ainsi que des plans solaires principal et perpendiculaire. Les scènes sont constituées de 160 cellules turbides (4x4x10) de maille d'échantillonnage fixe pour DARTMC (*i.e.*, $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 1$m) et verticalement variable pour DART : Δz prend les valeurs 1, 0.5, 0.2, et 0.1m. Les bandes spectrales R et PIR ont été choisies, car elles donnent lieu à des phénomènes radiatifs très contrastés. En effet, elles correspondent aux bandes d'absorption maximale (R) et minimale (PIR) des feuilles, ce qui explique leur emploi fréquent pour l'étude des surfaces naturelles depuis l'espace (*e.g.* indices de végétation). Les propriétés optiques des éléments de la scène (*Tableau II-1*) proviennent des données synthétiques de la première expérience RAMI (Pinty et al., 2001).

Paramètres		**Valeurs**
***Éclairement solaire* [°]**		
Angle zénithal : θ_s		20 - 50
***Paramètres de la scène* [m]**		
Taille des cellules : Δx, Δy, Δz		1, 1, {1 - 0.5 - 0.2 - 0.1}
Dimension horizontale : Dx, Dy		4, 4
***Propriétés optiques* [%]**		
Réflectance du sol : ρ_s	R	12.7
	PIR	15.9
Réflectance et transmittance foliaire : ρ_f - τ_f	R	5.46 - 1.49
	PIR	49.57 - 44.09

Propriétés structurales			
Indice foliaire : LAI (LAI_{cell}) [$m^2.m^{-2}$]	1 (0.1)		
Densité volumique foliaire : u_f [$m^2.m^{-3}$]	{0.1 - 0.2 - 0.5 - 1}		
Distribution foliaire : LAD (Leaf Angle Distribution)	Sphérique	Planophile	Érectophile
Dimension foliaire [cm] : d_f	{20 - 10 - 4 - 2}		{10 - 5 - 2 - 1}

Tableau II-1: Paramètres de la maquette : surface plane de sol nu surmontée par 10 couches turbides planes et homogènes. $\Delta x=\Delta y=1m$. Δz entre 1 et 0.1m. LAI = 1. Le rapport "$\Delta z/s_f$" est fixé à 0.05 (sphérique et planophile) et 0.1 (érectophile). Les "{}" dénotent les plages de variation des paramètres. s_f est fonction de d_f et du LAD (cf. chapitre 1).

Les différents couverts simulés sont caractérisés par un indice foliaire unité et trois fonctions normalisées de distribution des normales foliaires : LAD planophile (plutôt horizontal), LAD érectophile (plutôt vertical) et LAD sphérique (densité constante par stéradian). Elles sont calculées (*Figure II-1*-a) à partir de fonctions trigonométriques (Bunnick, 1978) :



a) b)

Figure II-1: Fonctions normalisées de distribution des normales foliaires (a) et fonctions $G(j,\Omega_n)$ associées (b) pour les trois LAD : sphérique, érectophile et planophile. $G(j,\Omega_n)$ est la proportion de surface foliaire d'interception efficace selon Ω_n (θ_n,ϕ_n). θ_n <0 : rétrodiffusion.

En fixant un LAI par cellule (*i.e.*, $LAI_{cell} = u_f.\Delta z$) à 0.1, la variation de Δz, entre 1 et 0.1m, permet d'obtenir des densités volumiques foliaires dans la même plage de variation u_f (m^{-1}) : 0.1, 0.2, 0.5, 1. Étant donné le nombre important de simulations, un LAI unité est un bon compromis entre les contraintes de temps de calcul des simulations DARTMC et des valeurs de u_f assez élevées pour détecter les imprécisions. De plus, pour éviter les variations de FRD autour du *hot spot* (associées aux dimensions foliaires), les simulations DART sont réalisées avec un rapport $\frac{\Delta z}{s_f}$ constant. En effet, l'équation du *hot spot* (Gastellu-Etchegorry et al., 1996a) montre que pour une taille apparente des feuilles s_f fixée non nulle, une augmentation de Δz tend à accroître la valeur du coefficient d'extinction $\alpha_e(\Omega_s,\Omega_v,\delta s_i)$. Cette augmentation de α_e diminue l'intensité du flux diffusé d'ordre 1 selon les directions proches de la direction de rétro-illumination entraînant, un rétrécissement de la largeur du pic de hot spot. Afin d'obtenir des résultats statistiquement fiables, les simulations Monte Carlo sont réalisées en lançant $25x10^6$ photons par cellule de la couche fictive, soit un nombre total de $400x10^6$ photons.

Les écarts moyens entre les modèles DART, DARTMC et/ou SAIL sont calculés à partir des expressions des écarts moyens (Demarez, 1997) adaptés à la discrétisation du milieu de propagation :

$$\varepsilon_{DS} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{N}(\rho_{DART} - \rho_{SAIL})^2.\Delta\Omega_v}{\sum_{n=1}^{N}\Delta\Omega_v}} \quad \varepsilon_{DD} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{N}(\rho_{DART} - \rho_{DARTMC})^2.\Delta\Omega_v}{\sum_{n=1}^{N}\Delta\Omega_v}} \qquad \text{(II-1)}$$

où ρ_{DART}, ρ_{DARTMC} et ρ_{SAIL} sont respectivement les FRD des modèles DART, DARTMC et SAIL; $\Delta\Omega_v$ caractérise l'angle solide associé à chaque direction discrète.

Ces deux expressions utilisent uniquement les N directions montantes avec des angles zénithaux inférieurs à 60°. Cette limitation permet de réduire la contrainte "temps de calcul/précision" associée à la modélisation Monte Carlo *i.e.*, la précision décroît beaucoup avec les forts angles, car le nombre de photons diminue beaucoup avec l'oblicité de la direction d'observation (Ross & Marshak, 1991). En fait, la limitation "$\theta_v < 60°$" est cohérente avec les directions d'observation de la plupart des capteurs spatiaux actuels (*e.g.* VÉGÉTATION 2 sur SPOT 5 : +/-55.4° et POLDER 2 embarqué sur le satellite japonais ADEOS-2 : +/- 51°).

Les écarts moyens $\varepsilon_{D/D}$ *i.e.*, DART *vs*. DARTMC et/ou $\varepsilon_{D/S}$ *i.e.*, DART *vs*. SAIL sont analysés et comparés en différenciant les plans solaires principal et perpendiculaire.

Désormais, à partir des profils de FRD (*Figure II-2*) R et PIR simulés pour deux géométries d'illumination (θ_s = 20° et 50°) et quatre dimensions verticales de cellules (CoteZ = Δz = 1, 0.5, 0.2 et 0.1m), les caractéristiques classiques suivantes sont observées :

- Dans le plan principal, les FRD simulés par les trois modèles présentent un effet de rétrodiffusion (*hot spot*) centré sur les angles zénithaux (θ_v = -20° et θ_v = -50°), égaux aux θ_s.
- Dans le plan principal, au voisinage du nadir (θ_v = 0°), les courbes de FRD sont rectilignes avec une pente négative, qui augmente avec θ_s, la longueur d'onde et l'inclinaison moyenne des feuilles (ALA). Cette plage de variation linéaire, qui dépend bien sûr de la position et de la largeur du *hot spot*, diminue avec ALA.
- Dans le plan perpendiculaire, les FRD tendent à être constants pour $\theta_v \in$ [-40°; 40°].
- Aux grands angles de visée (θ_v > 40°), les FRD augmentent dans le PIR et diminuent dans le rouge, car l'influence de la végétation s'accroît alors que l'influence du sol est réduite. Ce phénomène est amplifié (PIR) ou réduit (R) avec l'inclinaison solaire.

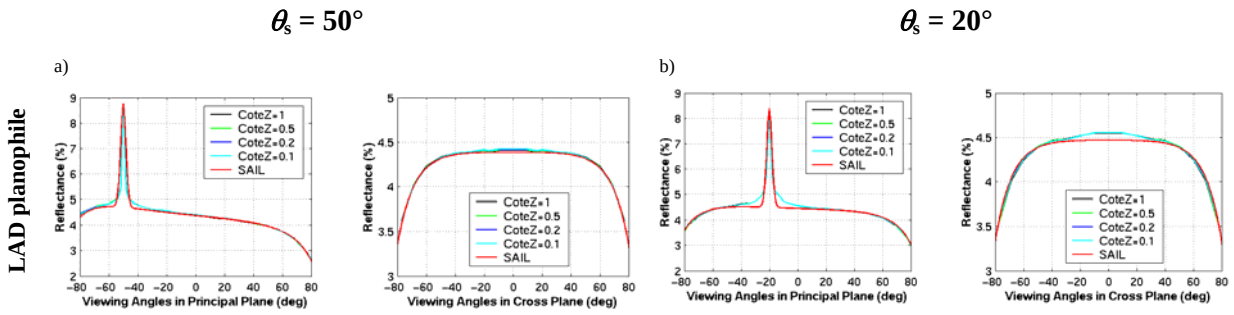
Dans le domaine spectral du rouge, les écarts moyens (*Tableau II-2*) entre les FRD simulés par les modèles DART et SAIL sont faibles et stables, quel que soit Δz, avec un légère augmentation inversement proportionnelle à θ_s. Dans le plan principal, pour θ_s = 20/50°, une diminution de Δz de 1 à 0.1m fait varier $\varepsilon_{D/S}$ de 0.048/0.027 % à 0.049/0.029 % (LAD sphérique), de 0.019/0.013 % à

0.019/0.012 % (LAD érectophile), et de 0.047/0.004 % à 0.0044/0.01 (LAD planophile). Les mêmes tendances sont observées dans le plan perpendiculaire. Ces simulations montrent aussi des FRD *hot spot* DART et SAIL quasi identiques pour tout Δz et θ_s. Les FRD DART sont aussi très proches des FRD DARTMC (*Figure II-2*), ce qui signifie que dans le rouge, l'impact de la variation de la hauteur des cellules est négligeable.

Dans le PIR, les FRD DART sont assez nettement supérieurs aux FRD SAIL (*Tableau II-2*): $\varepsilon_{D/S}$ > 1.5% (LAD sphérique), $\varepsilon_{D/S}$ > 2% (LAD érectophile) et $\varepsilon_{D/S}$ > 2.1% (LAD planophile). Ceci est expliqué par le fait que le modèle SAIL suppose l'isotropie du rayonnement diffus. D'autre part, les FRD DART tendent à être supérieurs aux FRD DARTMC pour le plan solaire et le plan perpendiculaire, avec des différences qui augmentent en fonction de θ_s et de l'anisotropie de la fonction de phase du milieu (*Figure II-2*). Dans le plan principal, avec une scène composée de cellules cubiques (*i.e.* Δz = 1m), $\varepsilon_{D/D}$ atteint, pour θ_s = 20°/50° (*Tableau II-2*) : 0.27/0.51% (LAD sphérique), 0.31/0.99% (LAD érectophile), et 1.12/1.33% (LAD planophile). Pour Δz = 10cm, avec les mêmes configurations solaires, $\varepsilon_{D/D}$ vaut : 0.23/0.4% (LAD sphérique), 0.22/0.78% (LAD érectophile) et 1.3/1.53% (LAD planophile). L'impact de Δz sur $\varepsilon_{D/D}$ diffère donc selon le LAD. Les deux facteurs majeurs à l'origine de ces écarts sont :

- position trop imprécise des barycentres énergétiques M_s car la diffusion est très sensible à la position des M_s. Cet impact apparaît surtout les composantes des FRD des ordres d'itérations supérieurs à 1 des couverts avec des fonctions de phase plutôt anisotropes.
- surestimation des diffusions multiples d'autant plus importante que la fonction G (*Figure II-1-b*) est anisotrope (LAD planophile). Cette surestimation a été évaluée en effectuant des simulations avec un nombre N_{sect} croissant de secteurs angulaires $\Omega_{sect,r}$, avec $r \in [1\ N_{sect}]$. En effet, une augmentation de N_{sect} permet de mieux prendre en compte de la distribution directionnelle du rayonnement intercepté, et donc de modéliser plus précisément les diffusions multiples des couverts anisotropes (Gascon, 2001; Gastellu-Etchegorry et al., 2004).

Il faut noter aussi que l'augmentation de u_f, due à la diminution de Δz, accroît les diffusions multiples à l'intérieur des cellules. Toutefois, au vu des valeurs de u_f considérées ici, les diffusions multiples au sein des cellules restent négligeables devant les diffusions d'ordre 1 (c*f.* chapitre I).



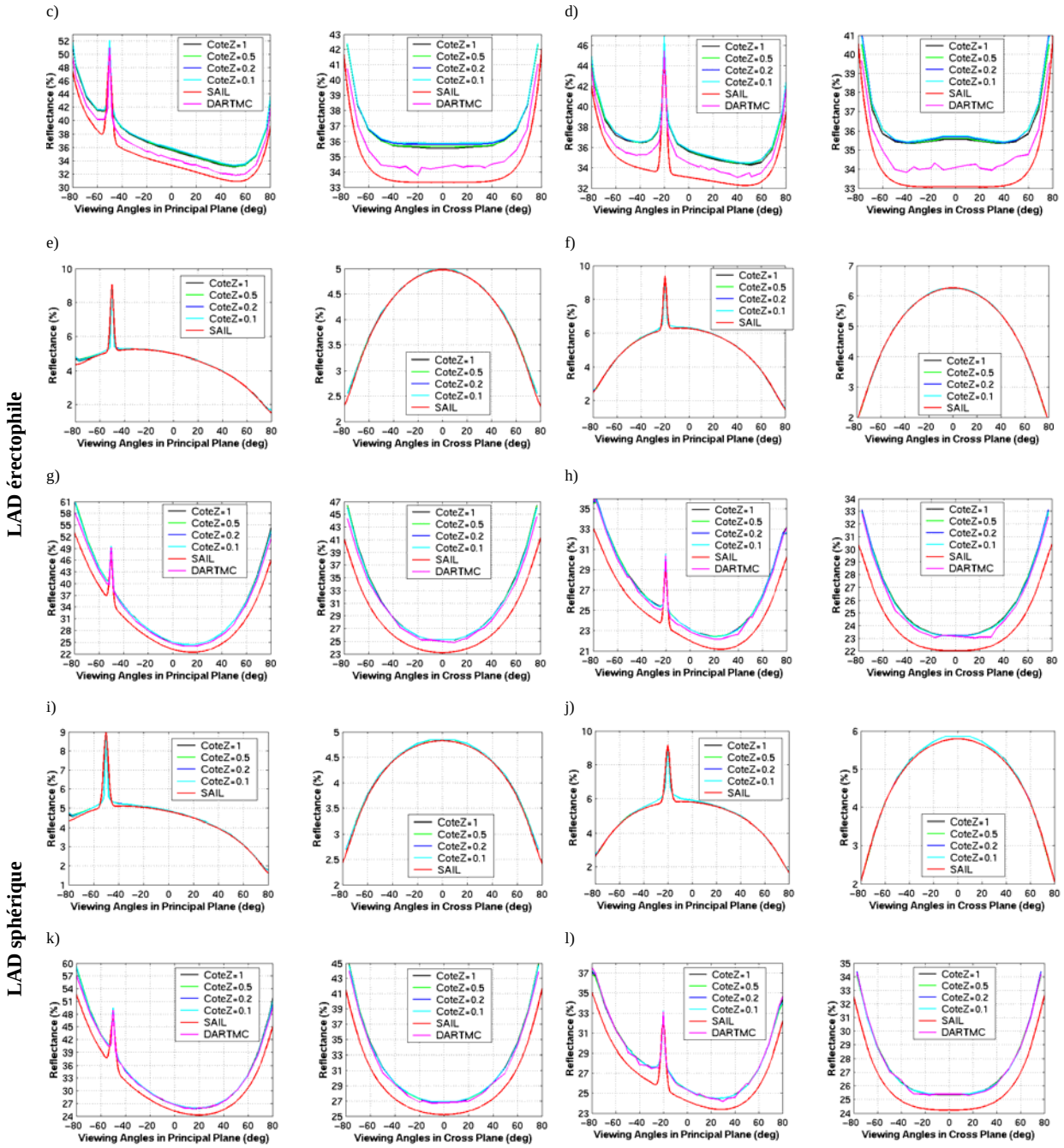


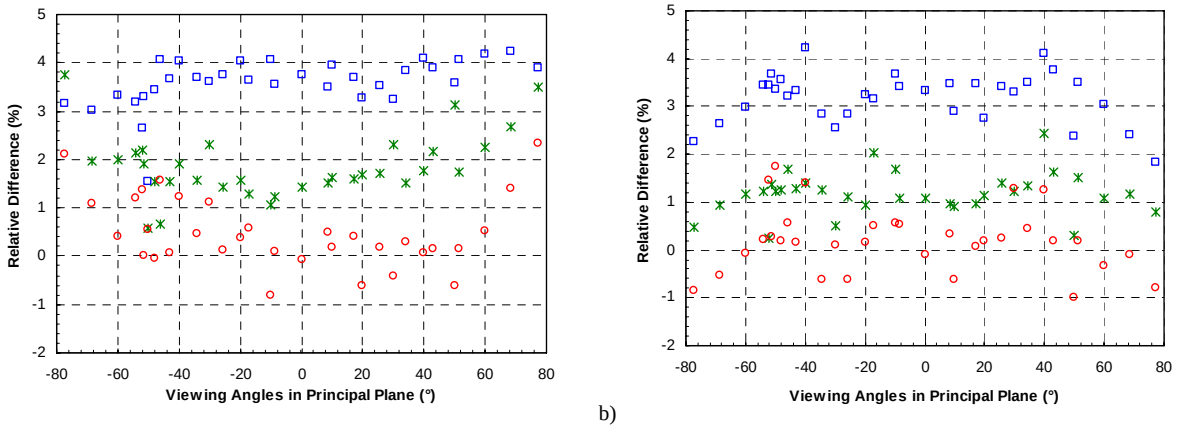
Figure II-2: FRD DART rouge (a,b,e,f,i,j) et PIR (c,d,g,h,k,l) de milieu turbide homogène (LAI=1) simulés pour différentes hauteurs de cellules (Δz). LAD planophile (a,b,c,d), érectophile (e,f,g,h) et sphérique (i,j,k,l). θ_s = 50 et 20°. Propriétés optiques définies dans le Tableau II-1. Les modèles SAIL et DARTMC servent de référence.

θ_S = 20/50°	**Écarts moyens dans le plan principal (%)** $\varepsilon_{D/D}$ **(DART *vs.* DARTMC)** $\varepsilon_{D/S}$ **(DART *vs.* SAIL)**								
LAD	***Sphérique***			***Érectophile***			***Planophile***		
Domaine	**R**	**PIR**		**R**	**PIR**		**R**	**PIR**	
Δz (m)	$\varepsilon_{D/S}$ (10^{-3})	$\varepsilon_{D/D}$	$\varepsilon_{D/S}$	$\varepsilon_{D/S}$ (10^{-3})	$\varepsilon_{D/D}$	$\varepsilon_{D/S}$	$\varepsilon_{D/S}$ (10^{-3})	$\varepsilon_{D/D}$	$\varepsilon_{D/S}$
1.0	47.87/27.25	0.27/0.51	1.56/2.69	18.91/12.79	0.31/0.99	2.09/3.73	47.23/4.12	1.12/1.33	2.08/2.26

0.5	49.93/26.7	0.28/0.44	1.63/2.61	18.64/11.25	0.31/0.91	2.12/3.62	41.73/8.94	1.21/1.39	2.25/2.27
0.2	49.51/28.11	0.22/0.39	1.6/2.66	18.64/12.09	0.28/0.81	2.06/3.63	42.95/9.27	1.28/1.47	2.29/2.42
0.1	49.15/28.62	0.23/0.4	1.58/2.7	18.63/12.42	0.22/0.78	2.02/3.63	43.69/9.76	1.3/1.53	2.32/2.49

Tableau II-2: Écarts moyens entre FRD "DART vs. DARTMC" ($\varepsilon_{D/D}$) et "DART vs. SAIL" ($\varepsilon_{D/S}$). Rouge (R) et proche-infrarouge (PIR) pour différentes hauteurs de cellules (Δz) dans le plan solaire principal avec θ_v<60°. LAD sphérique, érectophile, planophile. θ_s=20° et 50°.

La *Figure II-3* représente les écarts relatifs $\left(\frac{\rho_{DART} - \rho_{DARTMC}}{\rho_{DARTMC}}\right)$ dans le PIR. Ces écarts sont presque constants pour $\theta_v \in$ [-50°; 50°], quel que soit θ_s. Pour la direction du *hot spot*, ces écarts sont du même ordre de grandeur que ceux obtenus pour les autres directions : 0.5/0.2% (LAD sphérique), 0.5/1% (LAD érectophile) et 1.5/3.2% (LAD planophile). La quasi indépendance de $\varepsilon_{D/D}$ et θ_v indique que dans le PIR, l'impact de la position erronée des M_s est constante quelle que soit la direction de diffusion.



a) b)

Figure II-3: Écart relatif $\frac{\rho_{DART} - \rho_{DARTMC}}{\rho_{DARTMC}}$ entre les FRD DART et DARTMC d'un milieu turbide (LAI = 1) dans le PIR pour 3 LAD : Sphérique (○), érectophile (x) et planophile (□). a) θ_s = 50°. b) θ_s = 20°.

En résumé, les écarts observés sont dus à une mauvaise position des points M_s (*i.e.* imprécision barycentrique) et à une modélisation trop imprécise des diffusions multiples entre cellules.

II.2.3 Imprécisions barycentriques

Pour détecter les origines des imprécisions dues à une position erronée des M_s, les FRD DART et DARTMC sont comparés, en différenciant à la fois, les composantes sol et végétation simulées à l'ordre 1 de diffusion, et à un ordre dit infini. Seul le cas du PIR est présenté ici.

Le flux diffusé d'ordre 1 ($W_{1,MC}$ et $W_{1,DART}$), émergeant du couvert homogène, éclairé selon la direction solaire (Ω_s) par $W_{in}(\Omega_s)$, est la somme de la contribution du sol, atténuée par la végétation $W_{1sol}(\Omega_v\uparrow)$, plus la contribution des différentes couches turbides ($W_{1veg,MC}$ et $W_{1veg,DART}$).

- ***Composante du sol***

Pour DART et DARTMC, en appelant $W_{int,sol}(\Omega_s)$ l'énergie interceptée par le sol de réflectance lambertienne ρ_{sol}, le flux diffusé montant d'ordre 1, après atténuation par une couche homogène de hauteur Δz, s'écrit :

$$W_{1sol}(\Omega_v\uparrow) = W_{int,sol}(\Omega_s).\frac{\rho_{sol}}{\pi}.exp[-G(\Omega_v).u_f.\frac{\Delta z}{\mu_v}].\mu_v.\Delta\Omega_v \qquad \text{(II-2)}$$

Toute différence entre les FRD DART et DARTMC d'ordre 1 peut donc provenir, à la fois de l'énergie interceptée par le sol durant la phase d'éclairement solaire, et d'un écart sur l'atténuation du flux montant par la végétation. Les résultats observés montrent que pour le LAD sphérique (*Figure II-4*-a) les écarts relatifs fluctuent entre -2 et 2%. Par contre, pour les deux autres LAD, les FRD DART présentent une surestimation quasi-systématique de $W_{1sol}(\Omega_v\uparrow)$ proportionnelle à θ_s et d'autant plus importante que la fonction de phase du milieu est anisotrope. Les écarts relatifs sur les FRD atteignent, dans le plan principal : 3.8% (LAD érectophile, *Figure II-4-b*) et 4% (LAD planophile, *Figure II-4-c*). Les plus forts écarts surviennent pour le couvert planophile, autour du *hot spot* à θ_s = 50°. A "l'ordre infini", les écarts semblent se compenser, excepté pour le LAD planophile, qui exhibe des écarts relatifs strictement supérieurs à ceux obtenus à l'ordre 1.

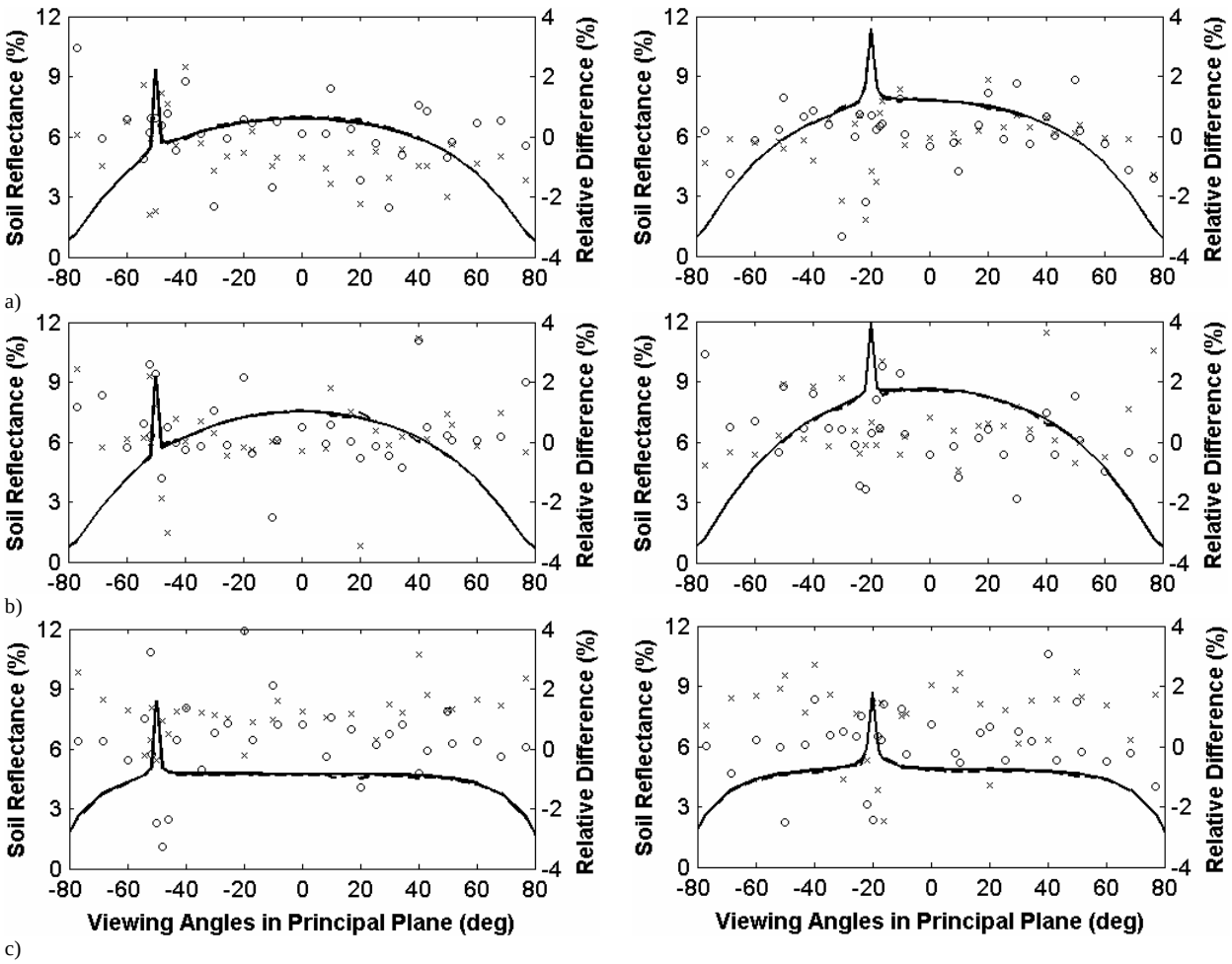


Figure II-4: Comparaison des FRD PIR du sol simulés par DART (ligne continue) et DARTMC (tirets) dans le plan solaire principal pour 3 LAD : Sphérique (a), érectophile (b) et planophile (c). θ_s=50°

(gauche) et θ_s=20° (droite). L'échelle de droite donne l'écart relatif $\frac{\rho_{DART} - \rho_{DARTMC}}{\rho_{DARTMC}}$ pour les diffusions d'ordre 1 (o) et d'ordre infini (x).

- ***Composante de la végétation***

Pour DARTMC, l'énergie moyenne diffusée d'ordre 1, associée aux directions de diffusion montantes, avec une fonction de transfert diffuse T_d, s'écrit :

$$W_{1veg,MC}(\Omega_v\uparrow) = W_{in}(\Omega_s).T_d(\Omega_s,\Omega_v).\frac{G(\Omega_s).\mu_v}{G(\Omega_v).|\mu_s| + G(\Omega_s).\mu_v}.\{1 - exp[-u_f.\Delta z.\left(\frac{G(\Omega_s)}{|\mu_s|} + \frac{G(\Omega_v)}{\mu_v}\right)]\} \quad \text{(II-3)}$$

En considérant $W_{int,veg}(\Omega_s) = W_{in}(\Omega_s).[1 - exp\left(-G(\Omega_s).u_f.\frac{\Delta z}{|\mu_s|}\right)]$, l'énergie interceptée par la végétation suivant la direction solaire (Ω_s) et $z_{m\uparrow}$, la coordonnée en z du barycentre énergétique associé aux directions montantes, $W_{1veg,DART}$ s'écrit :

$$W_{1veg,DART}(\Omega_v\uparrow) = W_{int,veg}(\Omega_s).T_d(\Omega_s,\Omega_v).exp[-G(\Omega_v).u_f.\frac{z_{m\uparrow}}{\mu_v}] \quad \text{(II-4)}$$

Il est utilisé le rapport $\xi(\Omega_v\uparrow) = \frac{W_{1veg,DART}(\Omega_v\uparrow)}{W_{1veg,MC}(\Omega_v\uparrow)}$. Avec l'hypothèse $u_f.\Delta z.\left(\frac{G(\Omega_s)}{|\mu_s|} + \frac{G(\Omega_v)}{\mu_v}\right)]$ petit, les développements limités à l'ordre 2 des expressions (II-3) et (II-4) conduisent à :

$$\xi(\Omega_v\uparrow) \approx \frac{(1 - G(\Omega_s).u_f.\frac{\Delta z}{2.\mu_s})[1 - G(\Omega_v).u_f.\frac{z_{m\uparrow}}{\mu_v}.(1 - G(\Omega_v).u_f.\frac{z_{m\uparrow}}{2.\mu_v})]}{1 - u_f.\frac{\Delta z}{2}.\left(\frac{G(\Omega_s)}{|\mu_s|} + \frac{G(\Omega_v)}{\mu_v}\right)]} \quad \text{(II-5)}$$

En fait, $z_{m\uparrow}$ est défini de manière à assurer que $W_{1veg,DART}(\Omega_v) = W_{1veg,MC}(\Omega_v)$ pour θ_v=20°, soit $\xi(\Omega_v\uparrow) = 1$ en l'absence de phénomène du *hot spot*. Ceci implique :

$$z_{m\uparrow} \approx \frac{\Delta z}{2} - \frac{G(\Omega_s).u_f.\Delta z^2}{8.|\mu_s|} \quad \text{(II-6)}$$

Pour le LAD sphérique (*i.e.* $G(\Omega) \approx 0.5\ \forall\Omega$), $z_{m\uparrow} \approx \Delta z.\left(\frac{1}{2} - \frac{LAI_{cell}}{16.|\mu_s|}\right)$. Dans ces conditions l'expression (II-5) devient :

$$\xi\uparrow \approx \frac{1 - \frac{LAI_{cell}}{4.\mu_s}[1 - \frac{LAI_{cell}}{2.\mu_v}.\left(\frac{1}{2} - \frac{LAI_{cell}}{16.|\mu_s|}\right) + \frac{LAI_{cell}^2}{8.\mu_v^2}.\left(\frac{1}{2} - \frac{LAI_{cell}}{16.|\mu_s|}\right)^2]}{1 - \frac{LAI_{cell}}{4.\mu_s}.\left(\frac{|\mu_s| + \mu_v}{\mu_v}\right)} \quad \text{(II-7)}$$

Dans le cas d'un LAI_{cell} petit et d'une direction au nadir : $\xi\uparrow > 1$, ce qui est cohérent avec la surestimation des FRD DART *vs*. DARTMC dans la *Figure II-5-a*. Les écarts varient très peu selon l'angle de visée θ_v si θ_s = 20°, mais ils augmentent fortement avec θ_v, si θ_s = 50°. Ces mêmes tendances sont observées

pour les deux autres couverts, avec toutefois des augmentations moins marquées pour le cas planophile (*Figure II-5-c*). En effet, les différences relatives à θ_v = 60°, augmentent fortement suivant θ_s : -0.05/1.8% (LAD sphérique), 0/1.9% (LAD érectophile) et 0/2% (LAD planophile), pour θ_s = 20/50°. Il apparaît aussi que les écarts relatifs "ordre 1-ordre infini", augmentent avec θ_s et diminuent avec l'inclinaison des feuilles. Ces remarques soulignent que le modèle DART surestime les mécanismes des diffusions multiples entre cellules, et ce d'autant plus que θ_s est grand et que la fonction de phase du milieu est anisotrope.

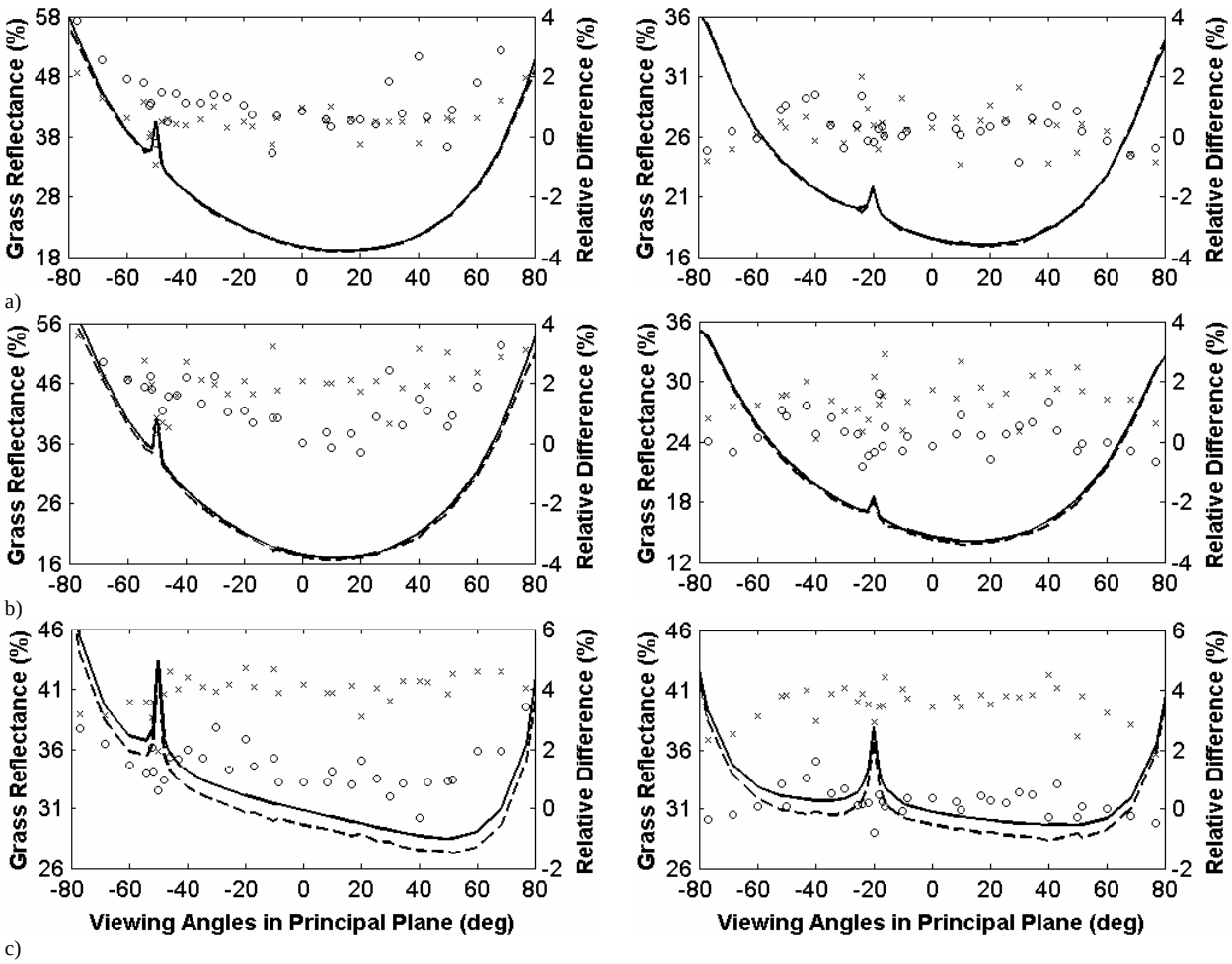


Figure II-5: Comparaison des FRD PIR de la végétation simulés par les modèles DART (ligne continue) et DARTMC (tirets) dans le plan solaire principal pour 3 LAD : Sphérique (a), érectophile (b) et planophile (c). θ_s=50° (gauche) et θ_s=20° (droite). L'échelle de droite donne l'écart relatif $\frac{\rho_{DART} - \rho_{DARTMC}}{\rho_{DARTMC}}$ *pour les diffusions d'ordre 1 (o) et d'ordre infini (x).*

II.2.4 Imprécisions de la représentation des diffusions multiples

La *Figure II-6* corrobore les remarques du paragraphe précédent. En effet, l'augmentation du nombre N_{sect} de secteurs angulaires n'améliore pas la modélisation des diffusions multiples (entre cellules). Elle entraîne au contraire une surestimation des FRD pour le couvert planophile et, dans une moindre

mesure, pour le couvert érectophile. Pour θ_s = 20/50° et N_{sect} respectivement égal à 1, 6 et 14, l'erreur quadratique moyenne (RMSE) entre les FRD DART et DARTMC croit régulièrement : 0.98/1.42%, 1.1/1.6% et 1.66/2.8% (LAD planophile), 0.84/1.51%, 0.79/0.1.86% et 1.26/2.65% (LAD érectophile). Pour la même plage de variation de N_{sect}, le couvert associé au LAD sphérique voit, au contraire, son RMSE décroître de manière monotone : 0.63/1.4%, 0.57/1.32% et 0.51/1.03%. Des simulations réalisées avec des N_{sect} supérieurs ont montré les mêmes tendances.

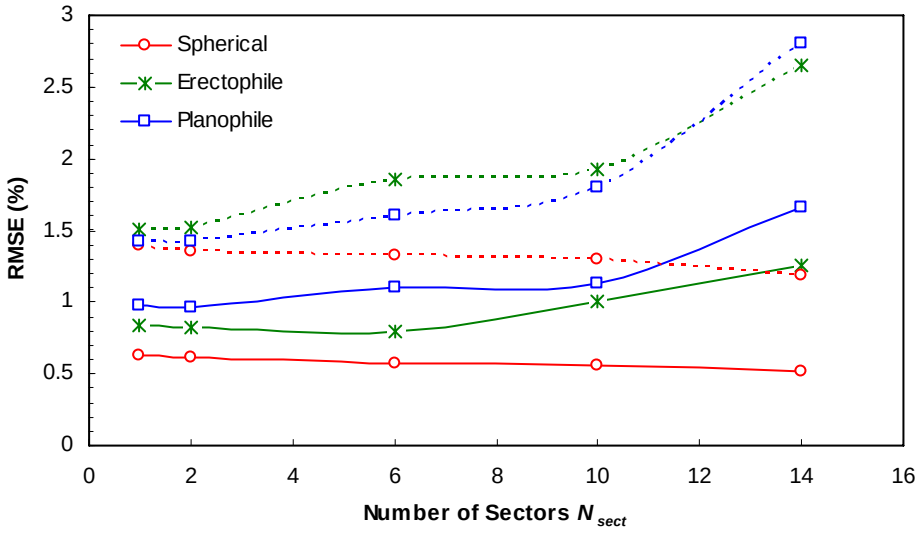


Figure II-6: Erreur quadratique moyenne (RMSE) entre les FRD PIR simulés par DART et DARTMC en fonction du nombre de secteurs angulaires N_{sect} pour 3 LAD : Sphérique (o), érectophile (x) et planophile (□). θ_s = 20° (trait plein) et 50° (pointillés). $\Delta x = \Delta y = \Delta z$ = 1m.

De plus, il est apparu que la discrétisation de la fonction de transfert diffuse T_d associée à $\Omega_{sect,r}$ avec r ∈ [1 N_{sect}] génère des albédos de diffusion foliaire $\omega_{d,r}$ (par secteur angulaire $\Delta\Omega_{sect,r}$), supérieurs à l'albédo foliaire total ω_d, calculé par le module *Phase* pour DARTMC :

$$\omega_{d,r} = \frac{1}{4\pi}.\sum_{v=1}^{N_{dir}}.T_d(\Omega_{sect,r},\Omega_v).\Delta\Omega_{sect,r} > \omega_d \qquad \text{(II-8)}$$

Ces résultats confirment que la modélisation des mécanismes des diffusions multiples doit être améliorée, ainsi que la discrétisation en secteurs angulaires. Par contre, vu la densité volumique foliaire assez faible (*i.e.* u_f = 0.1 m^{-1} pour Δz = 1m) ces surestimations proviennent essentiellement d'une représentation erronée des diffusions multiples entre cellules et non des diffusions intra - cellules. Toutefois, pour des u_f plus forts, les diffusions multiples à l'intérieur de la cellule doivent aussi être pris en compte. En effet, DART calcule W_M en supposant l'isotropie du rayonnement diffus qui donne lieu à la diffusion volumique au sein de la cellule (c*f.* chapitre I). Cette hypothèse est d'autant plus erronée que le LAD s'écarte du LAD sphérique. Son impact est cependant négligeable dans le cas de cellules de petites dimensions, soulignant, une nouvelle fois, l'intérêt de pouvoir simuler le T-R au sein de cellules non cubiques.

II.2.5 Solutions retenues

Trois solutions ont été développées afin d'améliorer la modélisation du T-R entre cellules turbides :

- 1ère solution : L'espace 4π de propagation des rayons est discrétisé en un nombre variable N_{sect} de secteurs angulaires. La possibilité de faire varier N_{sect} a pour but, de simuler de manière plus précise et ajustable la direction des rayons qui sont interceptés, compte tenu de l'hétérogénéité des scènes simulées et selon le niveau de précision souhaité.

- 2ème solution : Il est calculé deux barycentres énergétiques par face de cellule et non par cellule. Cette solution permet une meilleure prise en compte de la distribution du rayonnement incident (direct ou diffus) sur chaque cellule de végétation, ce qui améliore la précision radiométrique et géométrique du flux diffusé. Par suite, la distribution du rayonnement intercepté est en général représentée par douze barycentres, au lieu de deux barycentres pour l'ensemble de la cellule.

- 3ème solution : L'origine géométrique du rayonnement diffusé est améliorée. En effet, le simple emploi des sous centres les plus proches des barycentres énergétiques implique, surtout pour les directions de diffusions très obliques, que le rayon peut quitter la cellule par une face différente de celle par laquelle il serait sorti en l'absence de toute approximation. Ce décalage engendre donc, suivant la géométrie de diffusion, un rayonnement diffusé d'intensité supérieure ou inférieure à la valeur théorique (respectivement en rouge et en bleu sur la *Figure II-7*). Vu l'inclinaison des rayons, ces intensités peuvent varier fortement. De plus, une erreur de trajet [D_3 $D_{0''}$] pour des rayons montants fortement obliques, modifie le rayonnement intercepté par la cellule voisine entraînant, à l'itération suivante, des flux diffusés erronés pour des directions proches du nadir. Si l'on se place dans un repère 2-D, l'erreur de trajet suivant la composante en z peut atteindre $\frac{\Delta z}{10.\mu_v}$ entraînant une atténuation "supplémentaire" : $exp[-G(\Omega_v).u_f.\frac{\Delta z}{10.\mu_v}]$. Pour un angle maximal d'inclinaison (θ_v = 82.5°) avec un LAD sphérique et Δz = 1m, l'erreur atteint 0.4% pour $u_f = 0.01m^{-1}$ et 4% pour $u_f = 0.1m^{-1}$. La solution retenue, consiste à considérer comme origine géométrique du rayon diffusé, le centre de la sous-face la plus proche du point exact de sortie (*e.g.* point D3 sur la face 3, de la *Figure II-7*). Vu les contraintes "temps de calul/précision", les approximations utilisées sont adaptés à l'ordre d'itération (c*f.* chapitre I).

Une contrainte essentielle est que ces solutions censées améliorer la précision du modèle, ne doivent pas dégrader les temps de calcul ni augmenter fortement la mémoire vive allouée. Pour atteindre ces objectifs, une redéfinition des structures informatiques avec une vision plus dynamique et spécifique à chaque type de cellule a été intégrée.

Il est important de remarquer, que les solutions retenues sont d'autant plus efficaces pour améliorer la précision des simulations, que la densité volumique foliaire est importante. Ainsi, dans le cas d'une cellule "feuille" dense, l'emploi de barycentres par face permet par exemple d'éviter l'obtention d'un barycentre "irréaliste" au centre de la cellule.

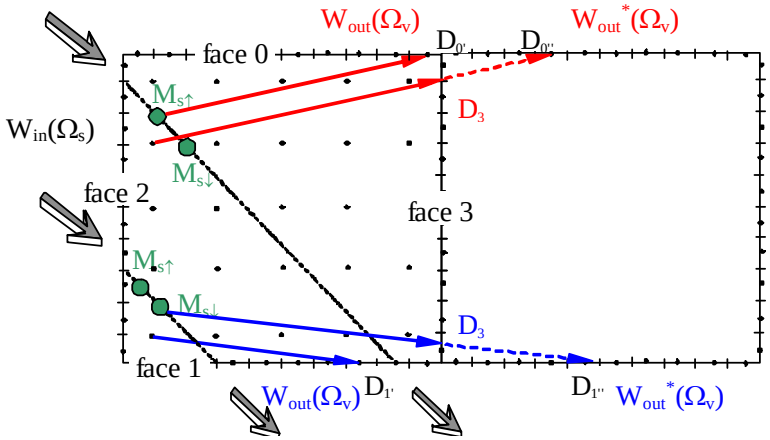


Figure II-7: Décalage géométrique entre les trajets du rayon issu du barycentre énergétique et du sous centre associé. Dans le cas d'une couche homogène éclairée par $W_{in}(\Omega_s)$, le suivi de $W_{out}(\Omega_v)$ à partir du sous centre le plus proche et non de M_s entraîne une diminution (augmentation) de trajet égale à $[D_3D_0'']$ ($[D_3D_1'']$). Par suite, la diffusion pour les directions obliques est soit amplifiée (rouge) soit atténuée (bleu).

II.2.6 Validation des améliorations

L'impact des améliorations est évalué en comparant les simulations réalisées par le nouveau (*i.e.* DARTv2005) et l'ancien (*i.e.* DARTv2003) DART à celles du modèle Monte Carlo (*Figure II-8*).

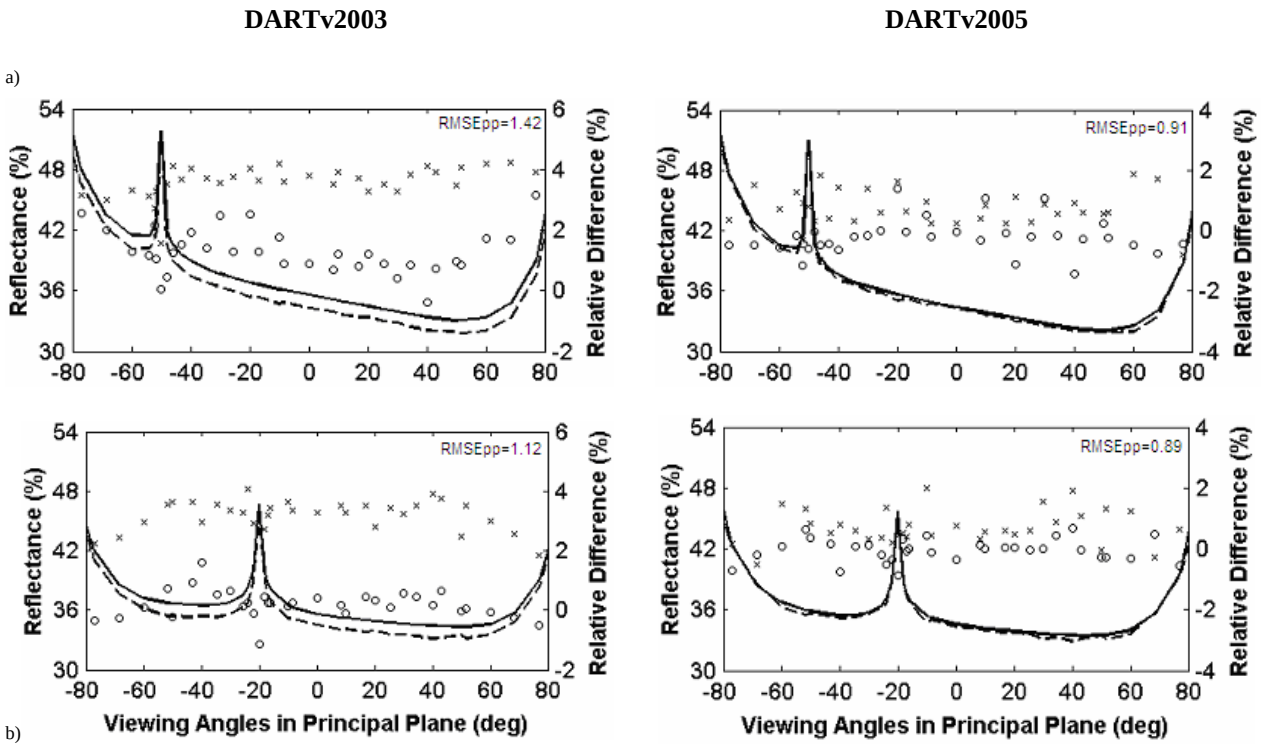


Figure II-8: Comparaison des FRD DART (ligne continue) et DARTMC (tirets) simulés dans le PIR avant

(gauche) et après (droite) modifications θ_s=50° (a) et θ_s=20° (b). LAD planophile. L'échelle de droite donne l'écart relatif $\frac{\rho_{DART} - \rho_{DARTMC}}{\rho_{DARTMC}}$ *pour les diffusions d'ordre 1 (o) et d'ordre infini (x).*

Dans les cas les plus défavorables du couvert planophile, les écarts par rapport aux simulations PIR DARTMC sont réduits, avec N_{sect} = 6, d'un facteur 2.5. Ainsi, l'écart relatif maximal dans le plan principal, décroît de 4.23 à 1.7% pour θ_s = 50° et de 4.22 à 2% pour θ_s = 20°. Il est intéressant de noter que ces résultats sont dus à une meilleure modélisation à la fois de la diffusion d'ordre 1 et des diffusions d'ordre multiple (*Tableau II-3*). Ainsi, les RMSE calculés à l'ordre 1 chutent de 0.66 à 0.15% pour θ_s = 50° et de 0.17 à 0.09% pour θ_s = 20°. A "l'ordre infini", ces écarts diminuent de 1.42 à 0.91% (θ_s = 50°) et de 1.12 à 0.89% (θ_s = 20°).

RMSE dans le plan principal : $RMSE_{pp}$ (%)				
θ_s	**50°**		**20°**	
Ordre de diffusion	1	∞	1	∞
DARTv2003	0.66	1.42	0.17	1.12
DARTv2005	0.15	0.91	0.09	0.89

Tableau II-3: RMSE (%) des FRD DART et DARTMC pour calculés dans le plan principal à l'ordre 1 et infini (itération :∞) pour DARTv2003 et DARTv2005 modifications. θ_s=50° et 20°. $\theta_v \in$ [-80°; 80°]. N_{sect} = 6.

En fait, les RMSE "FRD DART-FRD DARTMC" diminuent avec le nombre de secteurs N_{sect}. Ainsi, pour θ_s=20/50° et N_{sect} respectivement égal à 1, 6 et 14, les RMSE (%) entre les FRD DART et DARTMC décroît régulièrement pour tout LAD (*Figure II-9*) : 0.29/0.31, 0.2/0.26 et 0.15/0.23 (LAD sphérique); 0.69/0.72, 0.66/0.69 et 0.59/0.62 (LAD érectophile); 1.02/0.99, 0.99/0.95 et 0.86/0.89 (LAD planophile).

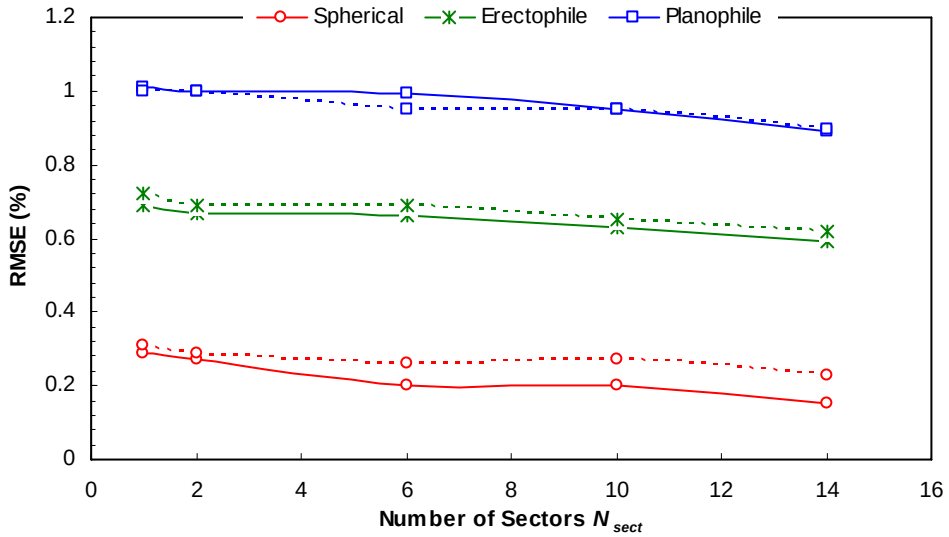


Figure II-9: Erreur quadratique moyenne (RMSE) entre les FRD PIR simulés par DART et DARTMC en fonction du nombre de secteurs angulaires N_{sect} pour 3 LAD : Sphérique (o), érectophile (x) et planophile (□). θ_s = 20° (trait plein) et 50° (pointillés). $\Delta x = \Delta y = \Delta z$ = 1m.

II.3 ÉMISSION THERMIQUE

II.3.1 Présentation

Des travaux ont été réalisés pour tester la validité de certaines hypothèses simplificatrices utilisées pour modéliser les échanges radiatifs thermique au sein d'un couvert théorique (*i.e.* turbide homogène). L'objectif était double :

- évaluer l'impact des améliorations apportées à la diffusion (c*f.* II.2.5) et,
- valider les modifications spécifiques apportées à la modélisation de l'émission thermique.

La validation d'un modèle T-R dans l'infrarouge thermique (IRT) consiste à comparer les signatures radiométriques (luminances et/ou températures de brillance) simulées par le modèle et les mesures *in situ* acquises au sol et/ou par l'intermédiaire d'un capteur aéroporté et/ou spatial. Cette étape est plus délicate à réaliser que dans le domaine spectral du rayonnement solaire réfléchi, car la distribution 3-D des températures fluctue rapidement en fonction de l'état hydrique du milieu et donc des conditions microclimatiques (vitesse du vent, profils de température et d'humidité de l'air, *etc.*).

Ici, il est utilisé comme référence, le cas d'un couvert 1-D constitué de diffuseurs isotropes. L'expression analytique de la température de brillance $T_B(\Omega_v)$ directionnelle d'un tel milieu, est en effet connue. Elle est obtenue par inversion de la loi de Planck appliquée à la luminance $L(\Omega_v)$ du milieu observé, assimilé à un corps noir. Elle varie en fonction des températures du sol (T_s) et des feuilles (T_f), du domaine spectral λ ainsi que des propriétés optiques [émissivité du sol $\varepsilon_s(\lambda)$ et foliaire $\varepsilon_f(\lambda)$] et structurales (LAI ou u_f et LAD) du milieu. Dans un premier temps, des simulations ont été réalisées au sein d'un couvert homogène isotherme pour valider la modélisation de l'émission thermique avec des cellules non cubiques et pour réaliser une étude de sensibilité aux paramètres précités (ε_s, ε_f, *etc.*). Bien évidemment, dans le cas d'une modélisation "parfaite", la dimension des cellules ne devrait pas affecter $T_B(\Omega_v)$. Dans un deuxième temps, la variation directionnelle de $T_B(\Omega_v)$ d'un couvert homogène 1-D non isotherme a été étudiée, en considérant notamment l'influence du rayonnement atmosphérique.

II.3.2 Milieu "sol + végétation" isotherme

La scène est constituée par une cellule de sol surmontée par dix et/ou trente couches de cellules de végétation permettant de simuler deux indices foliaires : LAI = 1 et 3. Les cellules sont de dimensions horizontales fixes (*i.e.* $\Delta x=\Delta y=1m$) et verticalement variables (*i.e.* Δz prend les valeurs : 1, 0.5, 0.2 et 1m). Le LAI de chaque cellule turbide LAI_{cell} est fixé à 0.1. La densité volumique u_f [m^{-1}] prend donc les valeurs : 0.1, 0.2, 0.5, et 1.

- ***Influence de la hauteur des cellules Δz***

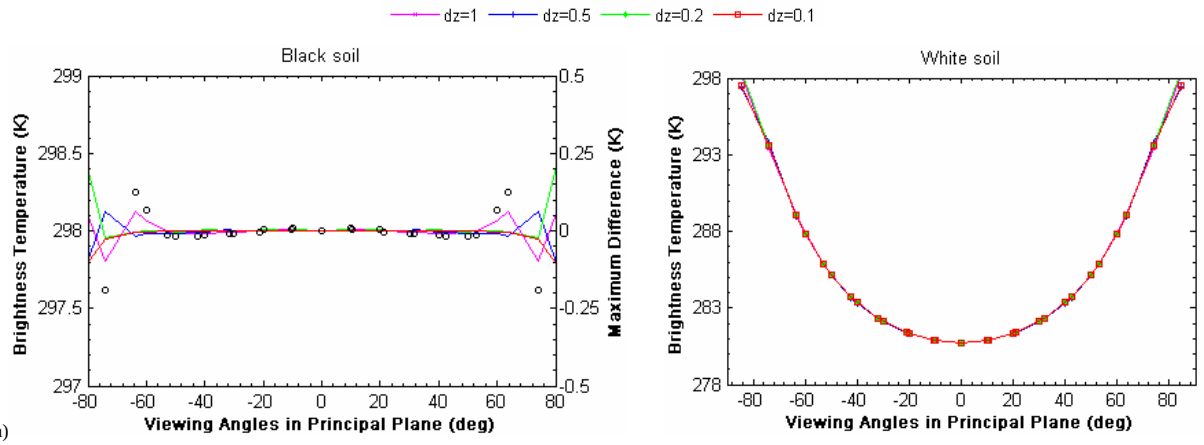
L'influence de la hauteur Δz des cellules (*Figure II-10*) sur la température de brillance $T_B(\theta_v)$ d'un milieu isotherme dont les feuilles ne diffusent pas, est présentée pour trois LAD : (a) sphérique, (b) érectophile

et (c) planophile. Les températures T_s et T_f sont fixées à 298K et ε_f vaut 1. Deux types de sol sont distingués : $\varepsilon_s = 1$ (sol noir) et $\varepsilon_s = 0$ (sol blanc).

Dans le cas d'un sol noir, le milieu est non diffusant ce qui signifie que les courbes représentent uniquement l'émission thermique. Ainsi, quel que soit le LAD et la densité foliaire simulée, une itération suffit pour converger vers la température de brillance exacte du couvert *i.e.*, la température T_{BB} d'un corps noir isotherme : $T_B(\theta_v) = T_{BB} = 298K \ \forall \ \theta_v$. Les écarts maximums $\Delta T_{max} = \max\{T_B(\theta_v) - T_{BB}\}$ sont atteints pour $\theta_v = 75°$: -0.19K (LAD sphérique), -0.21K (LAD érectophile) et -0.1K (LAD planophile). La meilleure "stabilité" directionnelle de $T_B(\theta_v)$ est observée pour le couvert planophile avec la discrétisation plus fine (*i.e.* $\Delta z = 0.1$m). Toutefois, dans cette configuration, la densité volumique unité entraîne une sous estimation systématique de $T_B(\theta_v)$ pour $\theta_v > 70°$.

Dans le cas du "sol blanc", l'émission thermique du sol est nulle alors que sa diffusion est forte étant donné que tout le rayonnement intercepté est diffusé. Les mécanismes de diffusion tendent à la fois à augmenter la température de brillance du sol et du milieu, particulièrement pour les directions proches de la verticale. Les courbes simulées sont concaves avec des niveaux radiométriques au nadir ($\theta_v = 0°$) qui chutent avec l'augmentation de la contribution du sol : 287.64K (LAD planophile), 280.74K (LAD sphérique) et 278.24K (LAD érectophile). En effet, au nadir, plus l'inclinaison des feuilles est proche de l'horizontale moins l'impact du sol est important. Pour les directions très obliques, la température de brillance du milieu tend vers la température obtenue avec le sol noir (T_{BB} = 298K), car l'influence du sol devient négligeable, et le milieu peut être assimilé à un corps noir isotherme non diffusant, de température égale à 298K.

(a)



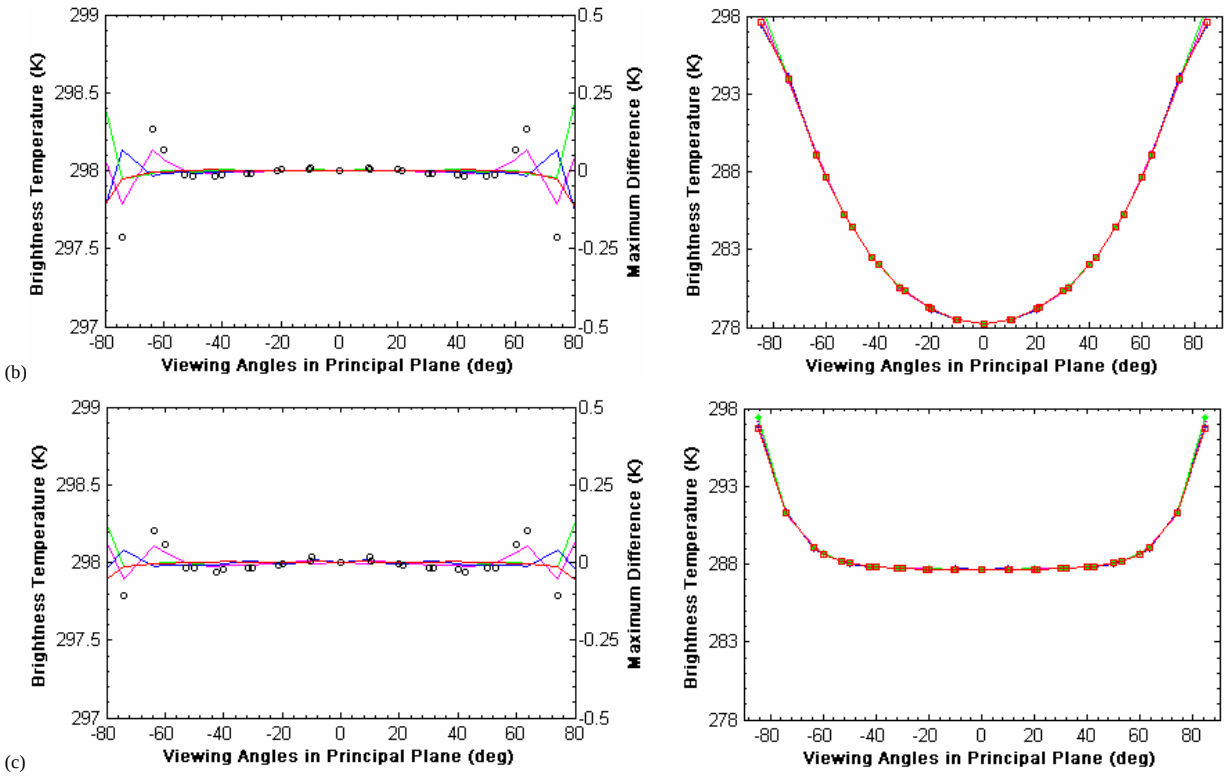


Figure II-10: Températures de brillance DART $T_B(\theta_v)$ d'un couvert homogène isotherme (T_{BB} = 298K) constitué de 10 couches de cellules turbides en fonction de Δz(m). LAI = 1. u_f = 0.1, 0.2, 0.5 et 1. 3 LAD : (a) sphérique, (b) érectophile, (c) planophile. Le sol est assimilé à un corps noir (gauche) ou blanc (droite). L'échelle de droite du cas "sol noir" (o) représente : $\Delta T_{max} = max\{T_B(\Omega_v) - T_{BB}\}$..

- ***Variabilité spectrale de la température de brillance***

Les températures de brillance spectrales $T_{B,\lambda}(\theta_v)$, sont calculées par inversion de la loi de Planck (c*f.* chapitre I), sur un intervalle spectral $\Delta\lambda$. Cette inversion s'appuie sur l'emploi d'une longueur d'onde équivalente λ_0, située dans $\Delta\lambda$. Dans ce travail, il est supposé $\Delta\lambda \approx 0$. Le but est d'étudier la variabilité de $T_{B,\lambda}(\theta_v)$ pour différentes longueurs d'onde λ. Il est considéré un couvert sphérique isotherme surmontant d'une part, une couche de sol noir et, d'autre part, un sol parfaitement diffusant (sol blanc). La maille d'échantillonnage est fixe et composée de cellules cubiques de 1m de côté. Les températures T_s et T_f sont ajustées à 298K et ε_f vaut 1.

Pour le couvert non diffusant (sol noir), le domaine spectral simulé n'influence pas la convergence de $T_B(\theta_v)$. La *Figure II-11* montre la très bonne stabilité directionnelle de T_B. Celle-ci n'est perturbée que pour des forts angles de visée (θ_v > 60°). Les erreurs maximales absolues $\Delta T_{max} = max\{T_B(\theta_v) - T_{BB}\}$ restent néanmoins comprises dans l'intervalle [-0.25K; 0.25K].

Dans le cas du sol blanc, plus le domaine spectral se rapproche des courtes longueurs d'ondes, plus les mécanismes de diffusion augmentent. Ce phénomène entraîne un accroissement de la température de

brillance, avec un impact d'autant plus marqué pour les directions proches du nadir *i.e.* où l'influence du sol est la plus forte.

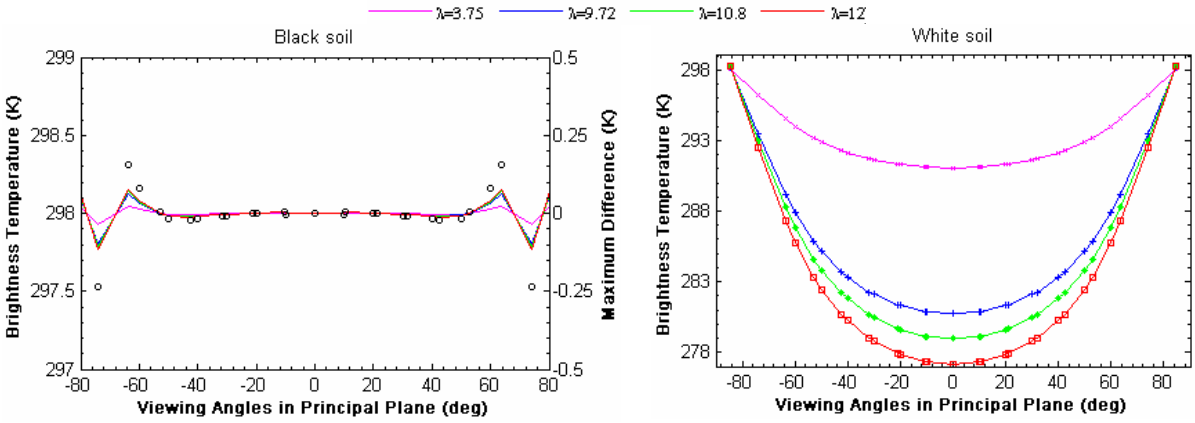


Figure II-11: Températures de brillance spectrales DART $T_{B,\lambda}(\theta_v)$ pour 4 longueurs d'ondes: $\lambda(\mu m)$ = 3.75, 9.72, 10.8, et 12. Couvert homogène isotherme (T_{BB}=298K) constitué de 10 couches de cellules turbides. LAI = 1. LAD sphérique. $\Delta x=\Delta y=\Delta z$=1m. Le sol est un corps noir (gauche) ou blanc (droite). Pour le sol noir, l'échelle de droite donne : $\Delta T_{max} = max\{T_B(\Omega_v) - T_{BB}\}$.

- ***Influence de l'émissivité du sol ε_s***

Comme précédemment, l'impact de l'émissivité du sol ε_s sur la température de brillance, a été testé avec une scène composée de cellules cubiques de 1m de côté. Les températures T_s et T_f sont fixées à 298K et ε_f est égale à 1. Deux indices foliaires sont testés : LAI = 1 et LAI = 3. Vu la forte variabilité radiométrique des éléments (naturels ou urbains) pouvant constitués le sol, ε_s varie sur toute la plage de variation possible : 0, 0.5, 0.8, 0.9 et 1.

La *Figure II-12* permet de vérifier que $T_B(\theta_v)$ augmente avec ε_s, conformément avec l'accroissement de la puissance rayonnée par le sol. Elle illustre aussi le fait que la température du couvert est d'autant plus sensible aux variations de ε_s de l'émissivité du sol, que la direction d'observation est proche de la verticale (θ_v = 0°), *i.e.* où la contribution relative de la végétation est la plus faible. Ainsi, l'impact de $\Delta\varepsilon_s$ est nul pour les directions très obliques pour tout LAI. Ceci explique que $T_B(\theta_v \approx 82.5°)$ converge vers T_{BB} = 298K.

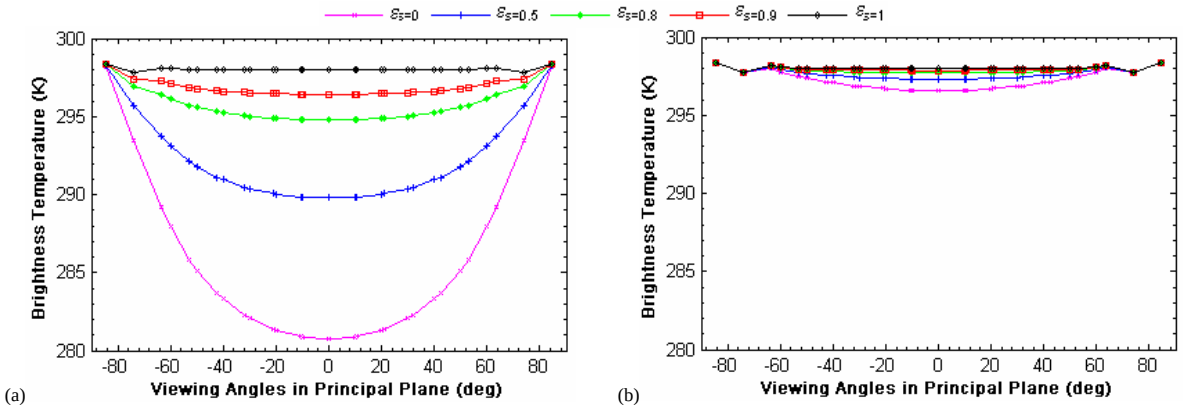


Figure II-12: Températures de brillance DART $T_B(\theta_v)$ d'un couvert homogène isotherme (T_{BB} = 298K) constitué de 10 (a: LAI = 1) ou 30 (b: LAI = 3) couches de cellules turbides en fonction de ε_s. LAI_{cell} = u_f = 0.1 et ε_f = 1. LAD sphérique.

Le *Tableau II-4* quantifie l'impact de $\Delta\varepsilon_s$, par rapport à ε_s = 1, pour deux directions d'observation : au nadir (θ_v = 0°) et pour l'inclinaison maximale ($\theta_{vmax} \approx 53°$), pour laquelle les erreurs dues à la discrétisation du milieu sont supposées négligeables. Pour un LAI unité, une modification de 10% de ε_s entraîne une variation de 1.59K pour $T_B(0°)$ et 1.15K pour $T_B(\theta_{vmax})$. Cette erreur diminue si le LAI augmente car l'influence du sol diminue. Elle devient négligeable à partir d'un LAI égal à 3 : 0.141K pour $T_B(0°)$ et 0.054K pour $T_B(\theta_{vmax})$. De même, la variation directionnelle de $T_B(\theta_v)$ est d'autant plus marquée que $\Delta\varepsilon_s$ est grand et que l'indice foliaire est faible. Ainsi, la différence $\{\Delta T_B(0°) - \Delta T_B(53°)\}$ augmente de 1.384 à 1.399 (LAI = 1) et de 0.087K à 0.439K (LAI = 3) pour $\Delta\varepsilon_s$ respectivement égal à 10% et 50%.

$\Delta\varepsilon_s$ [%]		10	20	50	100
$\Delta T_B(0°)$ [K]	LAI=1	1.587	3.202	8.218	17.251
	LAI=3	0.141	0.282	0.707	1.42
$\Delta T_B(53°)$ [K]	LAI=1	1.147	2.307	5.876	12.147
	LAI=3	0.054	0.107	0.268	0.536
$\Delta T_B(0°) - \Delta T_B(53°)$	LAI=1	0.44	0.895	2.342	5.104
	LAI=3	0.087	0.175	0.439	0.884

Tableau II-4: Variation $\Delta T_B(\theta_v)$ de la température de brillance $T_B(\theta_v)$ du couvert induites par 4 variations $\Delta\varepsilon_s$ de l'émissivité du sol. LAI=1 et 3. θ_v = 0° et 53°. Référence : $T_s = T_f$ = 298K, ε_f = 1.

- ***Influence de l'émissivité foliaire ε_f***

L'influence de l'émissivité des feuilles ε_f sur la température de brillance $T_B(\theta_v)$ es testée sur un couvert homogène sphérique (*Figure II-13*). Les températures T_s et T_f sont fixées à 298K et l'émissivité du sol ε_s est soit égale à 1 (sol noir), soit nulle (sol blanc). Dans cette étude, ε_f varie de 0.92 (feuilles très sèches) à 1. Pour tout ε_s, la température de brillance du couvert augmente avec la puissance rayonnée foliaire, puissance proportionnelle à ε_f. Pour le sol noir, l'impact de la variation $\Delta\varepsilon_f$ sur $T_B(\theta_v)$ est relativement

indépendant de la direction d'observation, excepté pour les forts angles de visée. Ceci est cohérent avec le fait que milieu foliaire est très peu diffusif.

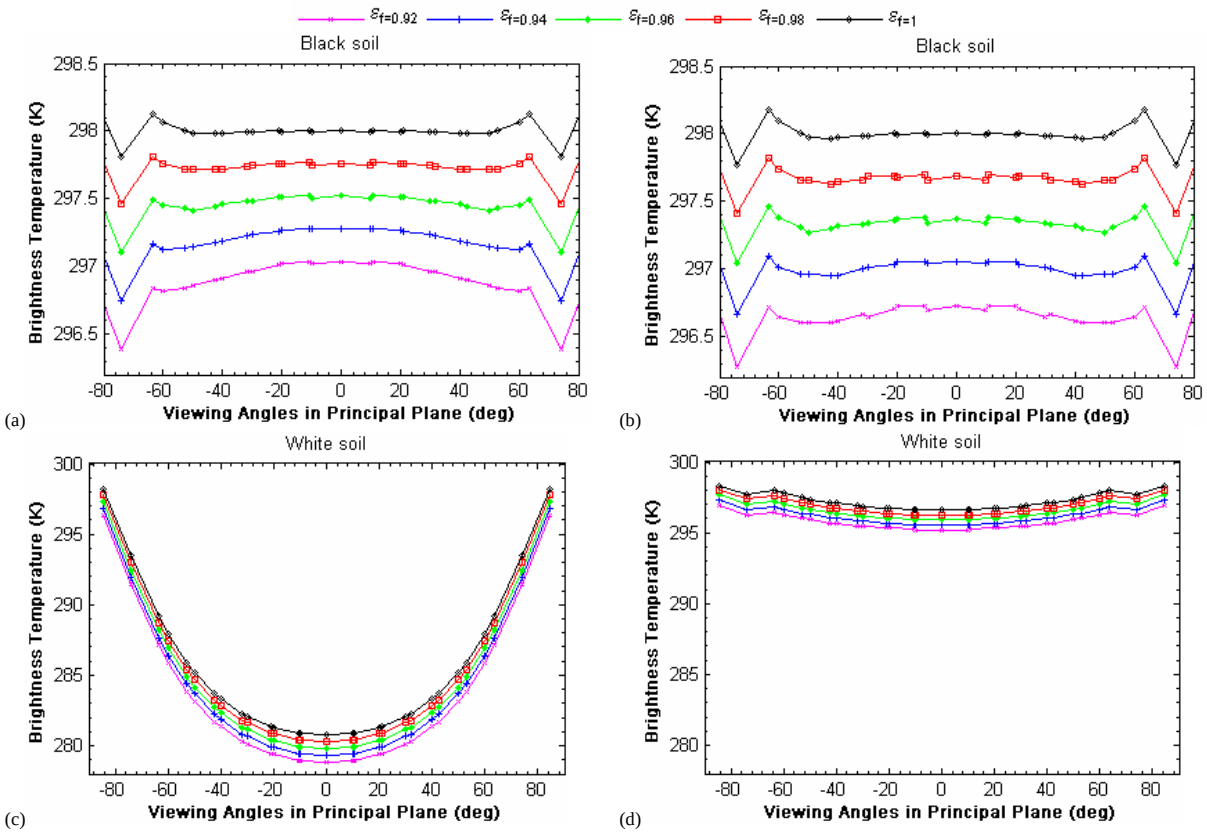


Figure II-13: Températures de brillance DART $T_B(\theta_v)$ d'un couvert homogène sphérique constitué de 10 (a - c: LAI = 1) ou 30 (b - d: LAI = 3) couches de cellules turbides en fonction de ε_f. $LAI_{cell} = u_f = 0.1$. Le sol est assimilé à un corps noir (a - b) ou blanc (c - d).

D'une manière logique, pour $\varepsilon_s = 1$ (sol noir), $\Delta T_B(\theta_v)$ augmente avec $\Delta\varepsilon_f$ et l'indice foliaire, quel que soit θ_v. Les résultats obtenus au nadir et pour $\theta_v = 53°$ sont reportés dans le *Tableau II-5*. Une variation $\Delta\varepsilon_f$ de 2% entraîne, pour un LAI unité, des variations $\Delta T_B(0°)$ et $\Delta T_B(53°)$ respectivement égales à 0.141K et 0.2K. Elles atteignent 0.184K et 0.239K pour un LAI de 3. De plus, la variation absolue $|\Delta T_B(0°)-\Delta T_B(53°)|$ est d'autant plus importante que $\Delta\varepsilon_f$ croît et que le LAI est faible. Ceci montre que l'impact de ε_f varie avec θ_v, étant donné l'augmentation des mécanismes de diffusion et d'interception foliaires aux grands angles.

Dans le cas du "sol blanc", $\Delta T_B(\theta_v)$ augmente aussi avec $\Delta\varepsilon_f$, mais avec un impact d'autant plus marqué que le LAI est faible. Un accroissement $\Delta\varepsilon_f$ de 2% à 4% implique que $\Delta T_B(0°)$ varie de 0.424K à 0.861K (LAI = 1) et de 0.222K à 0.449K (LAI = 3).

Enfin, pour une émissivité foliaire ε_f donnée, les termes $\Delta T_B(0°)$ et $\Delta T_B(53°)$ évoluent, pour les deux LAI, de manière inverse à $|\Delta T_B(0°)-\Delta T_B(53°)|$, quel que soit le sol.

$\Delta\varepsilon_f$ [%]		2		4		6		8	
ε_s		**1**	**0**	**1**	**0**	**1**	**0**	**1**	**0**
$\Delta T_B(0°)$ [K]	**LAI=1**	0.141	0.424	0.283	0.861	0.428	1.31	0.582	1.78
	LAI=3	0.184	0.222	0.371	0.449	0.562	0.681	0.774	0.935
$\Delta T_B(53°)$ [K]	**LAI=1**	0.2	0.444	0.402	0.901	0.609	1.37	0.818	1.853
	LAI=3	0.239	0.261	0.482	0.526	0.73	0.799	0.983	1.076
$\lvert\Delta T_B(0°)-\Delta T_B(53°)\rvert$	**LAI=1**	0.056	0.02	0.119	0.04	0.181	0.06	0.236	0.073
	LAI=3	0.055	0.039	0.111	0.077	0.168	0.118	0.209	0.141

Tableau II-5: Variations $\Delta T_B(\theta_v)$ de la température de brillance du couvert $T_B(\theta_v)$ dues à 4 variations $\Delta\varepsilon_f$ de l'émissivité foliaire, par rapport à ε_f=1. LAI = 1 et 3. ε_s = 1 et 0. Référence : $T_s = T_f$ = 298K.

II.3.3 Milieu "sol + végétation" non isotherme

Il est considéré un paysage simulé par : une cellule de sol surmontée par 10 (LAI = 1) ou 30 (LAI = 3) couches de cellules de végétation de dimensions horizontales fixes (*i.e.* Δx=Δy=1m) et verticalement variables (*i.e.* Δz compris entre 1 et 0.1m). L'indice foliaire de chaque cellule turbide LAI_{cell} est fixé à 0.1. Par suite, la densité volumique u_f [m^{-1}] vaut : 0.1, 0.2, 0.5, et 1. Les températures et émissivité du sol et des feuilles sont respectivement égales à T_s = 300K, ε_s = 0.94 et T_f = 298K, ε_f = 0.98.

- ***Influence de la hauteur des cellules Δz***

Il est étudié l'impact de la de la hauteur Δz des cellules sur la température de brillance $T_B(\theta_v)$ d'ordre 1, dans le cas d'un couvert sphérique 1-D, avec : LAI = 1 et LAI = 3. Pour chaque cas d'étude, $T_B(\theta_v)$ prend en compte (*Figure II-14*a-b) ou non (*Figure II-14*c-d), les diffusions W_M à l'intérieur des cellules. $T_B(\theta_v)$ reste relativement constant sur une large gamme de directions (*i.e.* θ_v < 53°) quel que soit l'indice foliaire, avec une valeur indépendante de la maille d'échantillonnage et donc de u_f. Au-delà, (*i.e.* $\theta_v \in$ [53°; 80°]) les variations, dues à la discrétisation du milieu, restent inférieures à 0.25K. Les diffusions multiples W_M, au sein des cellules, sont stables sur la même plage de θ_v que W_1. W_M croit avec l'indice foliaire et u_f. Toutefois, sa proportion, par rapport à W1, reste faible quel que soit θ_v : pour u_f = 0.1/1 $m^2.m^{-3}$, la contribution au nadir de W_M rehausse $T_B(0°)$ de 0.01/0.028K (LAI = 1) et de 0.02/0.055K (LAI = 3).

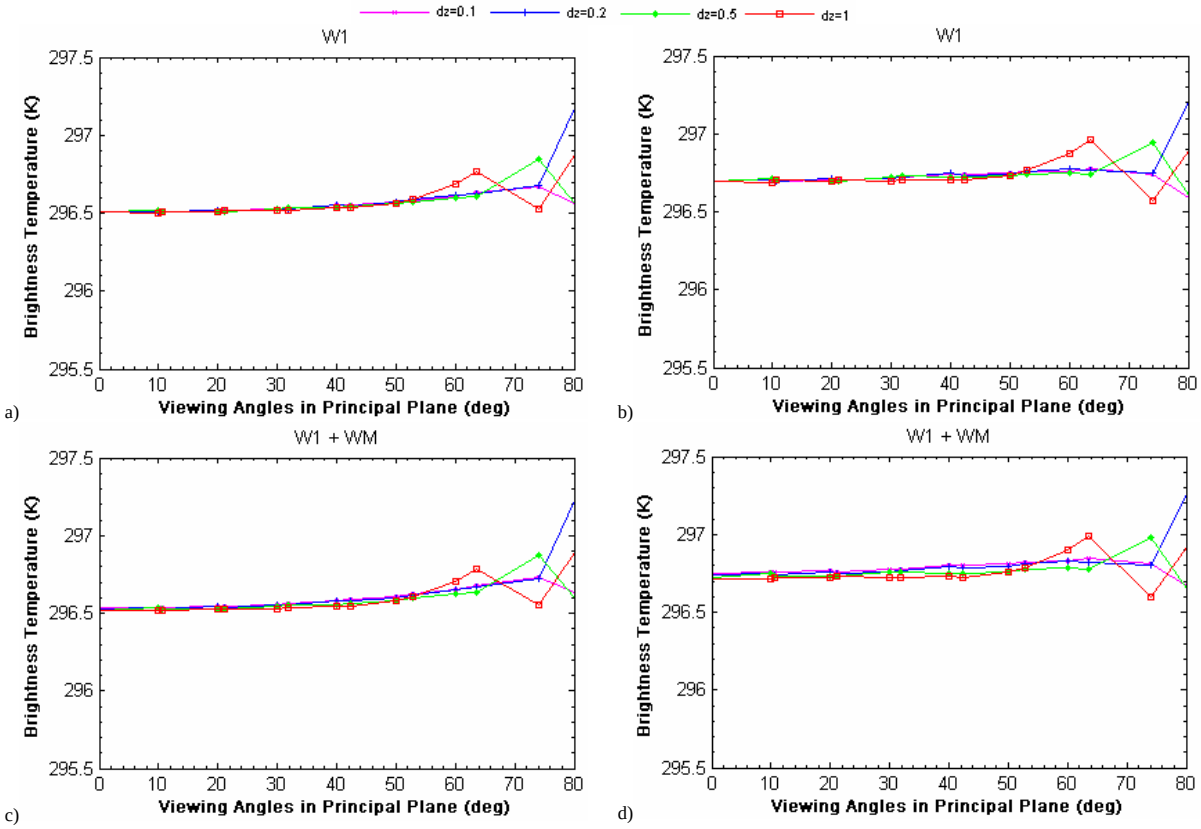


Figure II-14: Températures de brillance DART $T_B(\theta_v)$ d'ordre 1 d'un couvert homogène constitué de 10 (LAI = 1; a-c) ou 30 (LAI = 3; b-d) couches turbides en fonction de Δz. Sans (a, b) et avec (c, d) simulation des diffusions multiples à l'intérieur de la cellule. u_f varie entre 0.1 et 1. Sol : T_s = 300K, ε_s = 0.94. Végétation : T_f = 298K, ε_f = 0.98. LAD sphérique.

- ***Influence du rayonnement atmosphérique R_a***

L'impact de l'atmosphère sur $T_B(\theta_v)$ dépend de sa température (T_a) et des propriétés optiques et structurales du milieu. La *Figure II-15* montre l'influence de l'atmosphère sur un couvert 1-D sphérique pour différents Δz et pour deux indices foliaires : LAI = 1 (courbes a et b) et LAI = 3 (courbes c et d). Son impact n'est pas affecté par le niveau de discrétisation utilisé. Les écarts restent compris, comme pour le cas précédent, dans les mêmes plages de variations : $\Delta T_B(\theta_v) \approx 0$ pour $\theta_v < 53°$ et $|\Delta T_B(\theta_v)| < 0.25$K au-delà. L'influence de l'atmosphère est d'autant plus marquée que la direction est proche du nadir et que le LAI est faible. En effet, la présence d'atmosphère tend à augmenter la réflexion du sol, qui est l'élément le plus réfléchissant. Les écarts sont reportés dans le *Tableau II-6* pour Δz fixée à 10cm. Ainsi, un rayonnement atmosphérique R_a de 400W.m^{-2} entraîne une augmentation $\Delta T_B(0°)$ d'environ 0.83K (LAI = 1) et de 0.08K (LAI = 3). Les variations $\Delta T_B(60°)$ chutent à 0.51K (LAI = 1) et à 0.018K (LAI = 3).

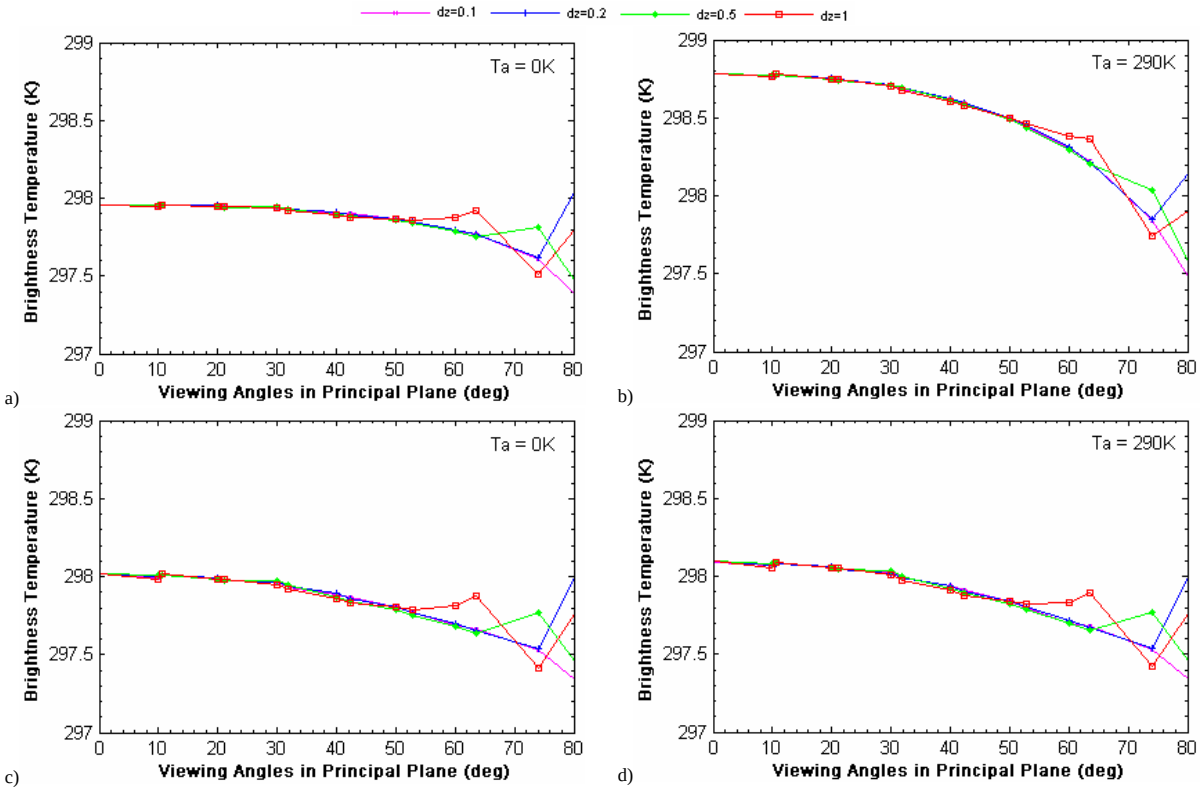


Figure II-15: Températures de brillance DART $T_B(\theta_v)$ d'un couvert homogène constitué de 10 (LAI = 1; a et b) ou 30 (LAI = 3; c et d) couches de cellules turbides en fonction de Δz. Sans (a et c) et avec (b et d) simulation du rayonnement atmosphérique. Sol: T_s = 300K, ε_s = 0.94. Végétation : T_f = 298K, ε_f = 0.98. LAD sphérique.

θ_v [°]		0	10	20	30	40	50	60
$\Delta T_B(\theta_v)$ [K]	LAI=1	0.828	0.822	0.804	0.768	0.715	0.633	0.51
	LAI=3	0.077	0.075	0.07	0.062	0.049	0.034	0.018

Tableau II-6: Variation $\Delta T_B(\theta_v)$ de la température de brillance $T_B(\theta_v)$ du couvert homogène sphérique induites par un rayonnement atmosphérique (R_a = 400W.m^{-2}). LAI = 1 et 3. Sol : T_s = 300K, ε_s = 0.94. Végétation : T_f = 298K, ε_f = 0.98.

II.4 CONCLUSION PARTIELLE

Ce chapitre a permis de tester la validité de certaines hypothèses simplificatrices utilisées par DART pour modéliser les mécanismes de diffusion et d'émission des cellules turbides. Pour ne pas perturber l'analyse des phénomènes avec des effets structuraux/atmosphériques, ces tests ont été réalisés sur un couvert théorique turbide et homogène, avec un éclairement solaire directionnel (mode R).

En "mode R", les FRD DART, SAIL et DARTMC diffèrent notablement, en particulier dans le PIR. L'analyse de ces différences a permis d'identifier des imprécisions de modélisation à trois niveaux : (1) simulation du T-R au sein de cellules non cubiques, (2) position erronée des barycentres énergétiques

M_s à l'origine du rayonnement diffusé et (3) représentation imprécise des mécanismes de diffusions multiples. Pour remédier à ces problèmes, trois solutions ont été adoptées :

- Discrétisation de l'espace 4π de propagation des rayons selon un nombre variable N_{sect} de secteurs angulaires;
- Emploi de deux barycentres énergétiques par face de cellule traversée par le rayonnement incident au lieu de deux par cellule;
- Modification de l'origine du rayonnement diffusé.

Les résultats obtenus, notamment dans le PIR avec une fonction de phase du milieu très anisotrope (*i.e.* planophile), montrent la pertinence des améliorations apportées : les écarts relatifs maximums sont réduits d'un facteur 2.5. Les RMSE, calculés dans le plan principal, chutent de 1.42 à 0.91% (θ_s = 50°) et de 1.12 à 0.89% (θ_s = 20°).

Les tests de validité ont aussi été réalisés en "mode T". Ils ont permis de vérifier la cohérence du modèle DART en fonction des principaux paramètres d'entrée et, de tester sa validité, dans le cas de couverts théoriques isothermes et non isothermes. Bien évidemment, la température de brillance d'un couvert dépend fortement de la distribution des températures à l'intérieur du milieu. Cette distribution 3-D peut être précisément estimée à partir du bilan d'énergie sur l'ensemble du couvert (Belot, 2002-2006).

Pour une validation plus complète du modèle DART, ces tests doivent être approfondis et transposés aux couverts naturels. Ce point est abordé dans le chapitre III, avec la comparaison des FRD DART, simulés sur un couvert forestier, à ceux d'un capteur hyperspectral à très haute résolution spatiale.

III INFLUENCE DES ELEMENTS LIGNEUX SUR LA REFLECTANCE DU SAPIN DE NORVEGE

III INFLUENCE DES ÉLÉMENTS LIGNEUX SUR LA RÉFLECTANCE DU SAPIN DE NORVÈGE..... 107
III.1 Introduction..... 108
III.2 Matériels et méthode 111
III.2.1 Site d'étude 111
III.2.2 Méthodologie 112
III.2.3 Mesures terrains et traitement des données 113
III.2.4 Images hyperspectrales AISA et prétraitement 117
III.2.5 Comparaison FRD DART vs. FRD AISA 119
III.2.6 Indices de végétation (NDVI, AVI, GEMI) et directionnel (HDS) 119
III.3 Résultats et validations..... 121
III.3.1 Paramétrisation de la forêt de conifères dans DART 121
III.3.2 Validation des FRD DART 125
III.4 Influence des éléments ligneux dans le houppier 128
III.4.1 Comparaison des FRD 128
III.4.2 Relation indices de végétation - LAI 138
III.4.3 Conséquences sur l'inversion du LAI 144
III.5 Conclusion partielle 145

III.1 INTRODUCTION

L'objectif principal de ce travail a été d'évaluer l'influence des éléments ligneux (*i.e.* troncs, branches, rameaux et brindilles) sur le facteur de réflectance bidirectionnelle (FRD, Martonchik et al., 2000) du sapin de Norvège (*Picea abies* (*L.*) *Karst.*). Cette meilleure compréhension des mécanismes d'intéractions "onde-matière" repose ici, sur la modélisation 3-D d'un milieu forestier complexe, à partir de mesures précises pour simuler, avec DART, les FRD à très haute résolution spatiale (THR). Elle participe à améliorer et/ou concevoir les méthodes d'inversion THR, basées sur les modèles de transfert radiatif (T-R), et notamment celles dédiées aux paramètres structuraux des couverts forestiers (*e.g.* LAI).

L'indice foliaire (LAI) est un paramètre structural essentiel de la végétation. Par le biais de la photosynthèse, il affecte particulièrement les flux de CO_2 (dioxyde de carbone) à l'interface biosphère atmosphère (Gower et al., 2001-2003; Turner et al., 2003-2005; Ahl et al., 2004). En raison de l'impact de la végétation sur le climat (Hoffmann & Jackson, 2000; Zeng & Neelin, 2000; Zhang et al., 2001), le LAI est un paramètre d'entrée clé, pour de nombreux modèles écophysiologiques et climatiques décrivant les processus de surface (Kucharik et al., 2000; Arora, 2002). Comme d'autres propriétés biophysiques et biochimiques de la végétation, il peut être dérivé d'images aéroportées et/ou satellitaires (Myneni et al., 2002; Atzberger, 2004; Fang & Liang, 2005; Koetz et al., 2005; Schaepman et al., 2005). Ainsi, les chaînes de traitement des données spatiales ont obtenu très tôt, de manière quasi opérationnelle, des produits "indice foliaire". Étant donné les préoccupations actuelles concernant les changements climatiques, l'obtention précise de ces produits est une priorité de la communauté scientifique (Myneni et al., 1997; Knyazikhin et al., 1998; Tian et al., 2002a-2002b; Shabanov et al., 2003-2005). La plupart des méthodes utilisées (*e.g.* inversion d'images spectrales, relations semi-empiriques LAI=f(NDVI), *etc*.) ont été développées pour les données acquises à basse résolution spatiale et ne sont pas applicables aux images THR (Gascon et al., 2004). Il convient donc d'étudier plus précisément, en mode direct, les signaux issus des pixels THR et d'établir des liens avec les paramètres de surface tel que le LAI.

L'hétérogénéité des couverts affecte beaucoup la détermination de leurs caractéristiques biophysiques et biochimiques depuis l'espace. Elle varie dans le temps et selon le type de végétation. Ainsi, l'hétérogénéité structurale du sapin de Norvège tend à augmenter avec l'âge du peuplement, à cause du processus de sénescence et de l'influence des contraintes environnementales (Remphrey & Davidson, 1992; Ishii & McDowell, 2002a). Quand l'arbre vieillit, l'accroissement de sa structure et celle des arbres voisins modifient l'interception de l'éclairement solaire, augmentant les effets d'ombre. Il en découle une déficience de lumière qui, couplée aux stress environnementaux (Taylor, 1998), entraîne la formation de structures irrégulières au sein des houppiers. La distribution foliaire de ces derniers (*i.e.* la densité volumique foliaire et les agrégats de bois et/ou d'aiguilles) résulte de transformations

morphologiques débutant par une phase de défoliation, systématiquement suivie par une phase de régénération (Gruber, 1994; Nicolini et al., 2001).

Cette modification architecturale du houppier est divisée en 5 stades (*Figure III-1*) de développement (Cudlin et al., 2001) : (1) Pendant le stade productif (stade 0 : jusqu'à 60 ans), la structure de l'arbre croît et se densifie, entraînant une déficience de lumière et, la chute des aiguilles plus anciennes situées près du tronc. (2) La défoliation du houppier s'amplifie durant le stade 1 avec les agents de stress environnementaux (stress hydrique, pollution, *etc*.). (3) Si ces agressions se prolongent, des défoliations en mosaïque apparaissent dans les parties hautes du houppier (stade 2) suivies par des défoliations périphériques durant le stade 3. (4) Pendant le stade de transformation le plus avancé (stade 4), le sommet du houppier se défolie et sèche. Ces différents processus physiologiques génèrent une forme 3-D unique des houppiers du sapin de Norvège, avec une distribution hétérogène spécifique des aiguilles d'une même génération (Ishii et al., 2002b). La proportion des éléments ligneux (*i.e.* troncs, branches, rameaux et brindilles) augmente durant les stades de défoliation, entraînant une diminution du LAI. Des études récentes sur les processus écophysiologiques du sapin de Norvège permettent de modéliser la distribution des éléments foliaires et ligneux (Kuuluvainen & Sprugel, 1996; Dzierzon et al., 2003). Ces relations structurales sont susceptibles d'être intégrées aux modèles T-R à condition que ces derniers reposent déjà sur une modélisation précise des intéractions "onde-matière".

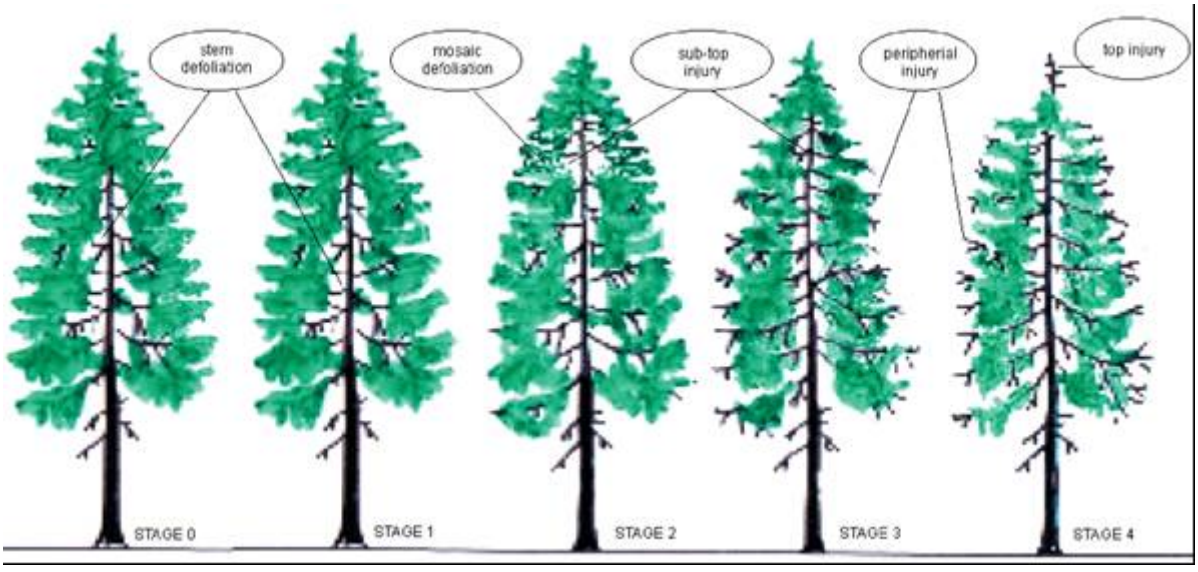


Figure III-1: 5 stades de transformation des houppiers des sapins de Norvège.

Concernant les mécanismes radiatifs, nombre de modélisateurs (Ross & Marshak, 1991; Leblanc et al., 2001; Smolander & Stenberg, 2003-2005; Rautiainen et al., 2004; Rautiainen & Stenberg, 2005) considèrent que le diffuseur élémentaire des conifères, n'est pas la feuille, comme pour les décidus, mais un ensemble d'aiguilles de même génération liées à leur base par une brindille. Cette entité est

notée dans la terminologie anglaise *shoot*. La modélisation DART est bien adaptée à cette représentation. En effet, il simule la végétation en tant que juxtaposition de cellules turbides caractérisées ou non par des "groupages foliaires" spécifiques (*i.e. clumping* dans la terminologie anglaise). De plus, il modélise désormais la distribution 3-D des branches et brindilles (c*f.* chapitre I). Il convient de noter que la représentation architecturale utilisée ainsi que la modélisation du T-R associé n'a pas pour objectif de représenter exactement la réalité comme le ferait le couplage d'un modèle de croissance de plantes, tel AMAP (http://www.bionatics.com), avec un modèle T-R de type Monte Carlo (*e.g. Flight* : North, 1996; *Raytran* : Govaerts & Verstraete, 1998; *Drat* : Disney et al., 2006). La modélisation implantée se veut plus généraliste et indépendante d'un simulateur d'objets 3-D. Elle s'inscrit dans le cadre du développement du logiciel DART.

Les mesures destructrices réalisées sur 16 sapins de Norvège de la parcelle d'étude révèlent une biomasse du bois de 13% alors que celle des feuilles atteint 87% de la surface de la canopée. Les méthodes de mesure du LAI des forêts intègrent toujours la présence du bois (Chen & Black, 1991; Kucharik et al., 1998; Jonckheere et al., 2004) alors que sa représentation dans les modèles géométriques (Strahler & Jupp, 1991; Li & Strahler 1992; Li et al., 1995), hybrides (Lacaze & Roujean, 2001) et T-R 3-D (North, 1996; Govaerts & Verstraete, 1998) est peu ou mal prise en compte. Ainsi, le modèle hybride *4-Scale* (Chen & Leblanc, 1997; Leblanc et al., 1999) modélise les troncs et les branches en tant qu'objets poreux tout en ignorant la distribution des agrégats de matières au sein du houppier. Kuusk & Nilson (2000) distribuent uniformément les branches dans les houppiers avec une orientation sphérique. Il est naturel de penser que le bois doit d'autant plus être pris en compte que sa réflectance est élevée. Ainsi, Myneni et al., (1997) emploient des réflectances du bois relativement faible (*i.e.* 3.79% dans le rouge et 10.02% dans la PIR), alors que l'écorce du sapin de Norvège a un facteur de réflectance direct-hémisphérique (FRDH) mesuré autour de 20-25% sur l'intervalle 600-700nm et 40-50% sur 800-900nm.

Dans cette étude, les houppiers sont modélisés suivant trois scénarios : (F) juxtaposition de cellules turbides foliaires et de cellules "vides"; (FW) intégration des troncs et des branches; (FWT) ajout des rameaux et brindilles. Afin de valider la fiabilité des simulations DART, les images simulées au nadir sont tout d'abord comparées à celles d'un capteur hyper spectral aéroporté AISA, pour les trois scénarios. L'impact des éléments ligneux est ensuite analysé tout d'abord sur (1) le FRD nadir des houppiers et sur (2) la distribution directionnelle des FRD totales, puis sur (3) quatre indices de végétation/directionnel (*i.e.* NDVI, AVI, GEMI et HDS).

III.2 MATERIELS ET METHODE

III.2.1 Site d'étude

La zone d'étude est localisée sur le site expérimental de recherche de Bily Kriz situé dans les monts Moravskoslezke Beskydy (*Figure III-2*), à la frontière Est de la République Tchèque et de la Slovaquie (18.54°E, 49.50°N; altitude : 936m au dessus du niveau de la mer).

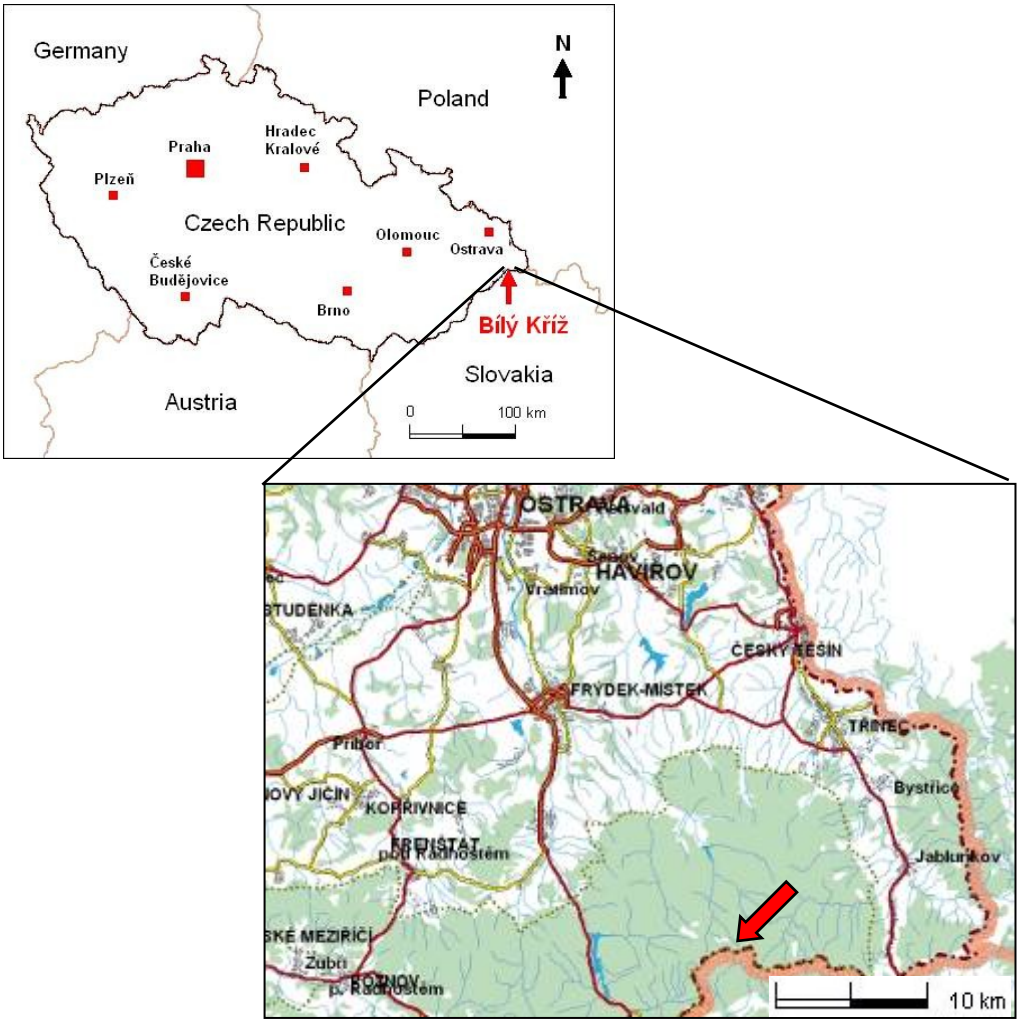


Figure III-2: Localisation du site expérimental de recherche Bily Kriz situé dans les monts Moravskoslezke Beskydy (frontière Est de la république Tchèque avec la Slovaquie).

Ce site se situe sur une zone géologique de grès de l'ère Mésozoïque. Le sol très acide, est un podzol humique associé à du sable glaiseux d'horizon minéral d'une épaisseur de 60 à 80cm contenant : 30 à 40% de gravier et 15 à 38% d'argile. Sur l'année, la température moyenne de l'air est environ 5.5°C, la précipitation moyenne de l'ordre de 1000 à 1400mm et la neige est présente pendant environ 160 jours. Le couvert forestier est composé d'une plantation régulière de sapins de Norvège (*Picea abies* (*L.*) *Karst.*) établis à partir de jeunes pousses (3 ans) plantés en 1981. Ces arbres, en stade productif (*Figure III-1*), ont une hauteur moyenne de 10.6m et un diamètre moyen, mesuré à 1.30m de hauteur (DBH) de 12.8cm. La zone de recherche de Bily Kriz fait partie des sites expérimentaux du projet

MODIS ASCII (*i.e.* zone de validation < 7km; http://www.modis.ornl.gov/modis/index.cfm) et du réseau global FLUXNET (http://www.fluxnet.ornl.gov/fluxnet/index.cfm), pour la mesure des échanges gazeux (CO_2, H_2O) et d'énergie entre le couvert forestier et l'atmosphère.

Il convient de noter que c'est la recherche de simulations précises sur ce site d'étude qui a conduit à l'amélioration de la modélisation des arbres (c*f.* Chapitre 1) dans DART.

III.2.2 Méthodologie

La modélisation de la parcelle forestière repose sur 3 représentations de l'architecture du houppier (*Tableau III-1*) : Le scénario "F" simule les houppiers en tant que juxtaposition de cellules turbides foliaires et de cellules "vides". Le scénario "FW" ajoute à "F" la simulation du bois (*i.e.* troncs + branches du 1er ordre directement reliées au tronc). Le scénario "FWT" ajoute à "FW" la prise en compte des rameaux et brindilles (*i.e.* les branches dont le diamètre est inférieur au centimètre). Ce troisième scénario tient compte de la mixité de matière au sein des cellules (*e.g.* branches + feuilles), en modélisant les "cellules mixtes". Le transfert radiatif associé est décrit dans le chapitre 1.

Scénario	*Éléments du houppier*	*Type de représentation*
F	Feuilles	Cellules Turbides
FW	Feuilles	Cellules Turbides
	Troncs, branches du 1er ordre[1]	Objets 3-D opaques[3]
FWT	Feuilles	Cellules turbides
	Troncs, branches du 1er ordre[1]	Objets 3-D* opaques[3]
	Rameaux[2]	Cellules turbides
	Feuilles + rameaux[2]	Cellules mixtes turbides
	Feuilles + rameaux[2] + bois (troncs et/ou branches)	Cellules mixtes

Tableau III-1: Description des 3 scénarios modélisant 3 architectures de houppier.
[1]Branches poussant directement depuis le tronc.
[2]Branches avec un diamètre inférieur au cm.
[3]Juxtaposition de figures opaques planes (triangles et/ou parallélogrammes).

L'évaluation de l'influence des éléments ligneux sur la réflectance au nadir du sapin de Norvège est réalisée en trois étapes (*Figure III-3*). Tout d'abord, les FRD DART sont comparés aux FRD mesurés par le capteur hyperspectral aéroporté AISA, après correction des effets atmosphériques. Les simulations DART de la parcelle de conifères sont réalisées à très haute résolution spatiale (THR), pour les trois scénarios (F, FW, FWT) et selon 4 longueurs d'onde : 559nm (vert), 671nm (rouge), 727nm et 783nm (PIR). Une fois ce travail de validation effectué, l'impact de l'architecture du bois sur la réflectance est étudié pour la direction d'observation verticale, puis pour les directions obliques. Enfin, une étude de sensibilité est réalisée pour évaluer l'impact des 3 scénarios sur les relations "indices de végétation (NDVI, AVI, GEMI) – LAI" et "indice directionnel (HDS) – LAI".

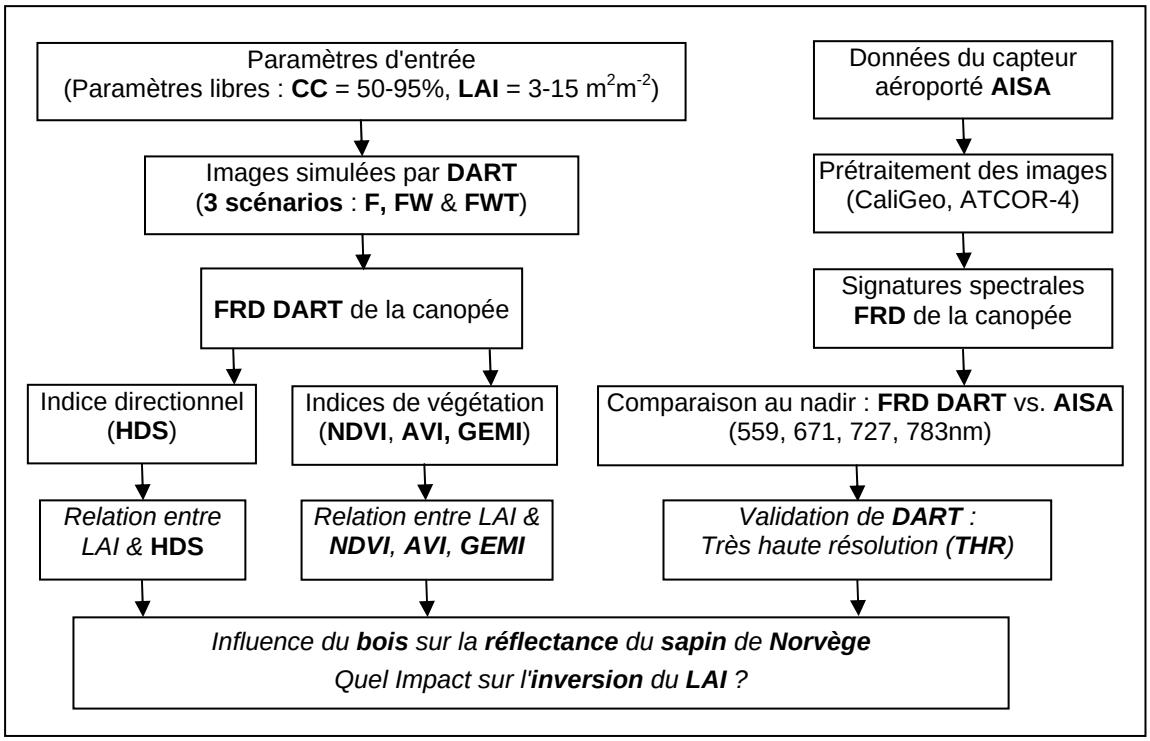


Figure III-3: Approche méthodologique pour évaluer l'influence du bois sur la réflectance d'une parcelle de sapins de Norvège. 3 scénarios : simulation de la couronne en tant que milieu "turbide" (F), milieu "F + tronc + branches" (FW) sans cellules mixtes et milieu "FW + rameaux + brindilles" avec cellules mixtes. CC : taux de couverture, LAI : indice foliaire, NDVI : indice de végétation normalisé, AVI : indice de végétation angulaire, HDS : indice directionnel "hot-dark spot", FRD : facteur de réflectance directionnelle.

III.2.3 Mesures terrains et traitement des données

Une campagne intensive de mesures s'est déroulée sur le site de Bily Kriz durant les mois d'août et septembre 2004. Nos collaborateurs, Z. Malenovsky et L. Homolova de l'université de Wageningen (CGI), y ont participé, sous la supervision du Docteur Radek Pokorny de l'Académie des Sciences de République Tchèque (ASCR). Les données utilisées pour effectuer une paramétrisation précise de DART concernent : (1) l'architecture des houppiers, (2) la structure des branches, (3) l'indice foliaire (LAI) et (4) les propriétés optiques des éléments de la canopée et du sol.

La distribution spatiale des arbres et l'architecture des houppiers sont déterminées numériquement à partir d'un télémètre laser et d'une boussole électronique combinés au logiciel FieldMap (http://www.fieldmap.cz). Ainsi, sont mesurés directement sur le terrain : les positions des arbres (coordonnées x, y), les DBH, les hauteurs de la partie "active" et "morte" des houppiers ainsi que leurs projections au sol, *etc*.

- ***Architecture des houppiers***

Pour chaque espèce foliaire (j), la distribution verticale u_f[j,l] de la densité volumique foliaire u_f[j] suivant le niveau (l) du houppier, nécessite la connaissance du "poids vertical" w[j,l] (c*f*. Chapitre 1). Celui-ci se déduit de la surface foliaire totale (LA_t) du houppier, déterminée à partir de mesures

destructives réalisées sur seize arbres de même génération, classés selon trois catégories : dominant, moyen et dominé. Ainsi, pour chaque arbre simulé, associé à l'une des trois classes précédentes, on a :

$$LA_t = 3.201 * C_a - 25.687 \quad \text{(III-1)}$$

où C_a est l'aire du houppier (m^2), supposé de forme conique (r^2=0.94). w[j,l] est la fraction de LA_t au niveau horizontal *l* (*Figure III-4*).

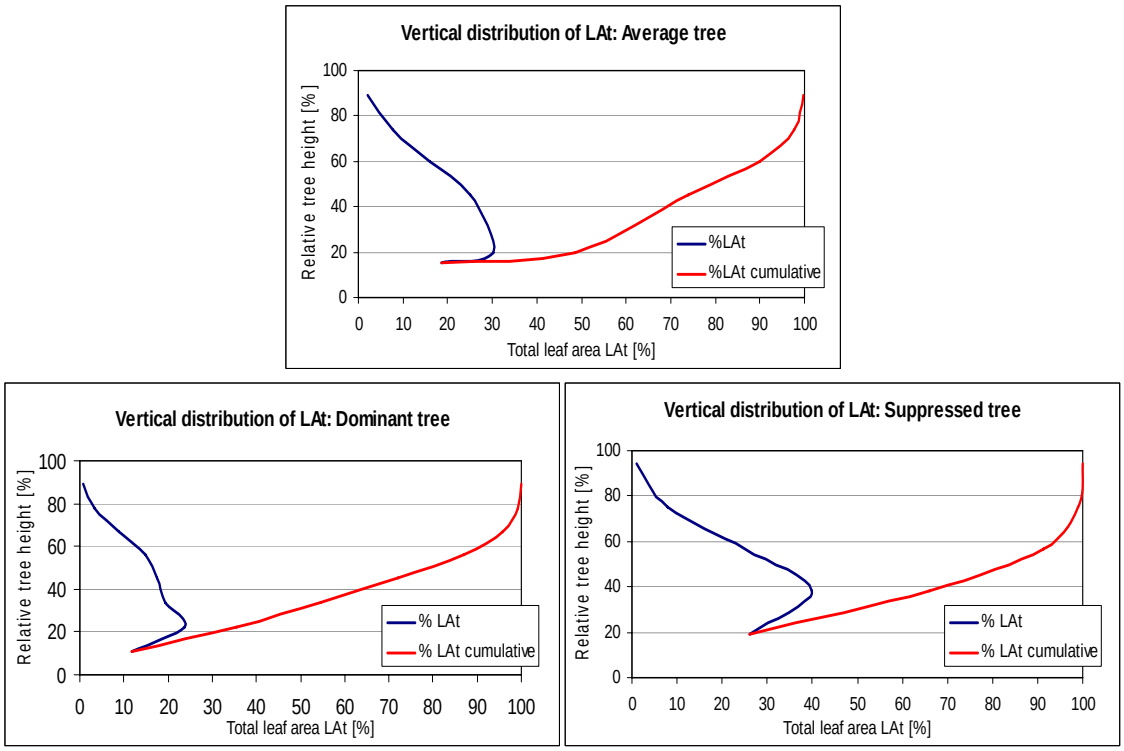


Figure III-4: Distribution verticale du pourcentage de la surface totale foliaire (LA_t) suivant la catégorie de l'arbre (dominé, moyen, dominant). La majorité des éléments foliaires est entre 20 et 50% (moyen), autour de 40% (dominé) et entre 25 et 60% (dominant).

- ***Structure des branches***

Les mesures destructives des branches permettent de déterminer précisément leur structure suivant 3 niveaux : (1) densité d'aiguilles classées en fonction de leur age, (2) distribution horizontale de la densité volumique foliaire (u_f) à partir de la base du tronc vers la périphérie du houppier et (3) distribution spatiale des parties vertes autour des branches. Il en résulte différents paramètres "DART" associés à la distribution horizontale de u_f par niveau horizontal *l* du houppier (c*f.* chapitre 1) : α[j,l(x,y)], β[j,l(x,y)], γ[j,l(x,y)] et κ[j,l(x,y)] pour la distribution des feuilles et p[j,l], a[j,l], b[j,l] pour la distribution des "trous".

La collecte des branches est effectuée dans les trois zones fonctionnelles du houppier (Homolova, 2005) : la zone haute, dite zone juvénile, la zone intermédiaire, dite zone productive et la zone basse dite zone de saturation. Cette étape permet d'extraire la position et les dimensions des branches. Les mesures destructives effectuées en laboratoire portent sur 24 branches. Leur analyse comprend cinq

étapes : (1) Division de chaque branche en plusieurs segments (*Figure III-5*) de dimensions différentes suivant la zone de collecte du houppier (*e.g.* 40 cm pour la partie haute et 60 cm pour les parties basses et intermédiaires). (2) Mesure (longueur, profondeur et diamètre) des dimensions de la base et du sommet du bois pour chaque segment. Les aiguilles sont classées par génération et leur pourcentage respectif est calculé. (3) Mesure des surfaces projetées des brindilles (*i.e.* branches de diamètre inférieur à 1cm) et des aiguilles ainsi que leur biomasse sèche respective [g]. Ces mesures sont effectuées sur 10 pousses (*i.e.* ensemble d'aiguilles de même génération regroupées autour d'une brindille formant une "grappe") représentatives de la distribution des différentes classes, sélectionnées sur chaque segment. La biomasse sèche est aussi mesurée deux mois après la collecte. (4) Mesure des diamètres (base et extrémité) et volumes des branches de diamètre supérieur au centimètre. (5) Détermination pour chaque segment, à partir des 10 pousses, de l'aire foliaire spécifique (SLA : cm^2/g), *i.e.* projection de la surface des aiguilles fraîches [cm^2] sur la biomasse sèche des aiguilles [g].

La distribution spatiale des contours et trous de chaque segment (*Figure III-5*) est obtenue de manière qualitative en traitant, avec le logiciel ArcGis (http://www.esri.com/software/arcgis/), les photographies numériques des branches. Ainsi, l'intersection du système foliacé de la branche, numérisée avec des cercles concentriques (*i.e.* centrés sur l'origine de la branche et de rayons proportionnels à la dimension des cellules DART), donne la surface totale occupée par la branche dans chaque cercle. Cette surface est combinée aux mesures destructives pour déterminer la surface totale des aiguilles dans chaque cercle. La courbe représentative cumulée est ensuite interpolée par une fonction sigmoïde s{r(x,y,z)} pour déduire les paramètres β[j,l(x,y)] et γ[j,l(x,y)], respectivement égaux à la valeur maximale et minimale de la dérivée seconde de s{r(x,y,z)} (Homolova, 2005).

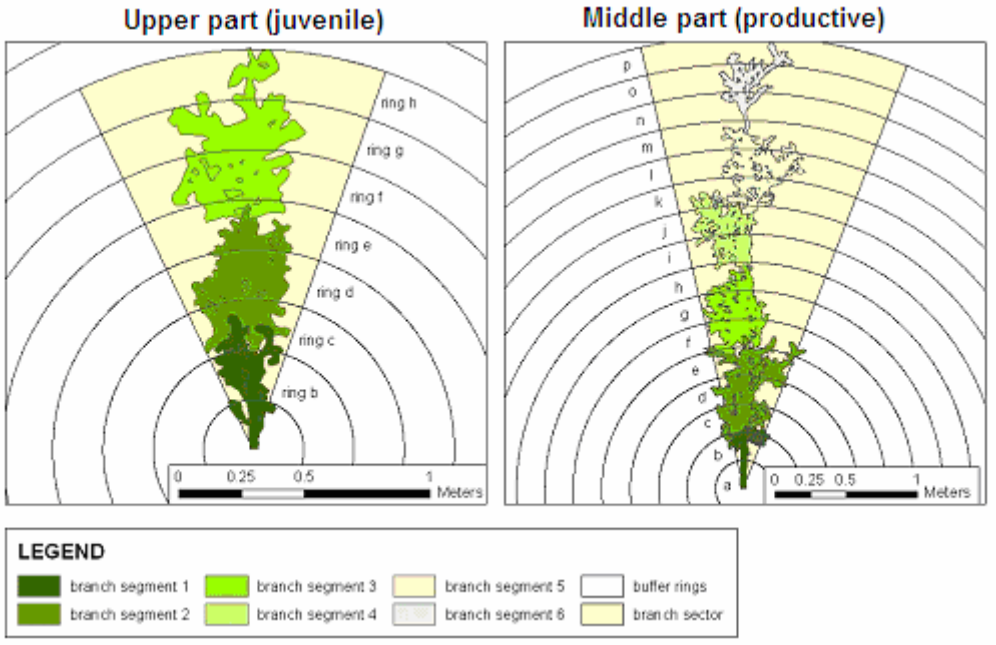


Figure III-5: Reconstruction de branches issues de la partie haute (gauche) et intermédiaire (droite) du houppier. (Homolova, 2005).

- ***Indice foliaire***

Les valeurs réelles de LAI sont obtenues par une méthode optique indirecte au moyen d'une caméra numérique à objectif hémisphérique sur une parcelle de forêt de $75x10m^2$. Cette zone est échantillonnée par un réseau de mesures constitué de douze matrices de 3x3 points chacun distant de 5m (*Figure III-6*), distribués suivant trois transects parallèles Est-Ouest. La position géographique de chaque point de mesures est déterminée grâce au système GPS combiné à d'autres appareils de mesure (télémètre laser, boussole électronique, *etc.*). Le LAI est évalué en traitant, avec le logiciel CAN EYE (Weiss, 2004), plusieurs photographies hémisphériques pour les douze points M1-M12. Ce logiciel classe les pixels des images, acquises selon deux directions verticales (montante et descendante), en deux catégories (respectivement "feuille" et "ciel" ou "sol"), à partir desquelles il calcule l'indice foliaire réel et effectif (LAI_{ef}).

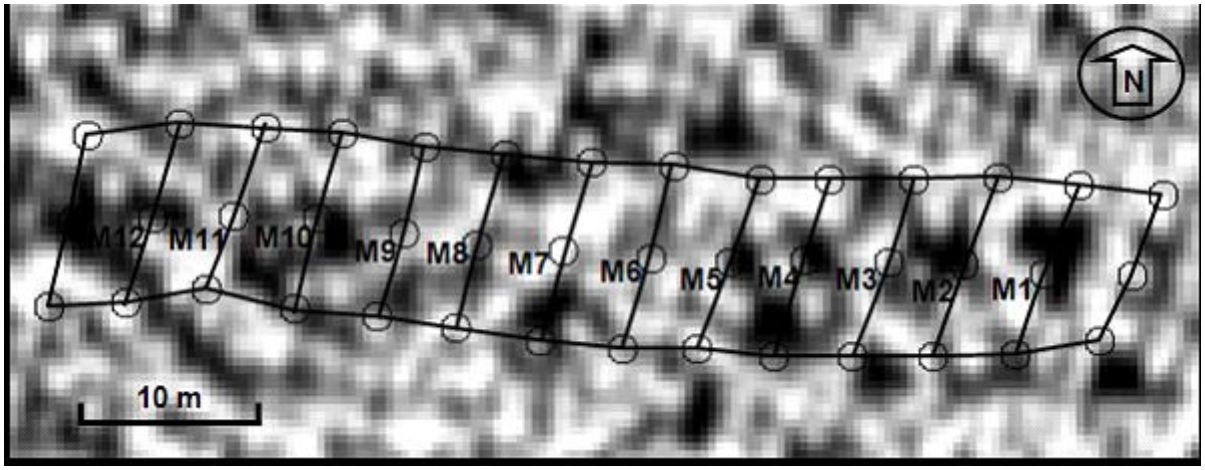


Figure III-6: Réseau de points suivant 3 transects parallèles de direction Est-Ouest pour la mesure du LAI et la validation des FRD. Il est superposé à une image AISA (738nm). M1-M12 représentent les 12 centres des matrices constituées de 3x3 points de mesure chacun espacé de 5m.

- ***Propriétés optiques***

Les facteurs de réflectance direct-hémisphérique (FRDH) et les transmittances des éléments du houppier (aiguilles et écorce) et du sol (litière et sol nu) sont mesurés en laboratoire avec un spectroradiomètre ASD FieldSpec Pro (ASD, USA), couplé à une sphère intégratrice LI-1800-12 (Li-Cor, USA). Les échantillons d'aiguilles des 3 dernières générations, extraites des zones des houppiers au soleil ($3^{ème}$ verticille depuis le sommet) et à l'ombre ($7^{ème}$ verticille au sein du houppier), sont collectés sur 10 arbres sélectionnés sur la parcelle d'étude. Leurs propriétés optiques sont représentatives de sept niveaux du houppier. Elles sont mesurées sur la gamme 350-2500nm avec un intervalle spectral de 1nm, suivant une méthodologie proposée par Daughtry et al. (1989) et améliorée par Middleton et al. (1997) et Mesarch et al. (1999). Elles sont classées suivant l'age et la densité des aiguilles. Trois zones de houppier sont distinguées en fonction de leur niveau d'interception au rayonnement solaire : la zone "à l'ombre" (SC) contenant les trois niveaux horizontaux de la base du

houppier, la zone "éclairée" (EC) contenant les deux niveaux supérieurs et une zone intermédiaire (*Tableau III-2*) contenant deux niveaux.

Niveau l du houppier	***Hauteur Relative de l'arbre [%]***	***% des aiguilles classées par génération***			***Zone***
		C - 2	**C - 1**	**C (r)**	
I	0 - 15	1	5	94	SC
II	15 - 30	11	15	74	SC
III	30 - 45	25	51	54	SC
IV	45 - 60	50	24.5	25.5	SC + EC
V	60 - 75	56.5	20.5	23	SC + EC
VI	75 - 90	63.5	25	11.5	EC
VII	90 - 100	75	16	9	EC

Tableau III-2: Distribution verticale des aiguilles classées suivant 3 générations (de la plus ancienne C - 2 à la plus récente C) obtenue à partir des mesures destructives.

Les propriétés optiques des aiguilles de la zone intermédiaire sont calculées en moyennant les propriétés optiques des aiguilles des 2 autres zones.

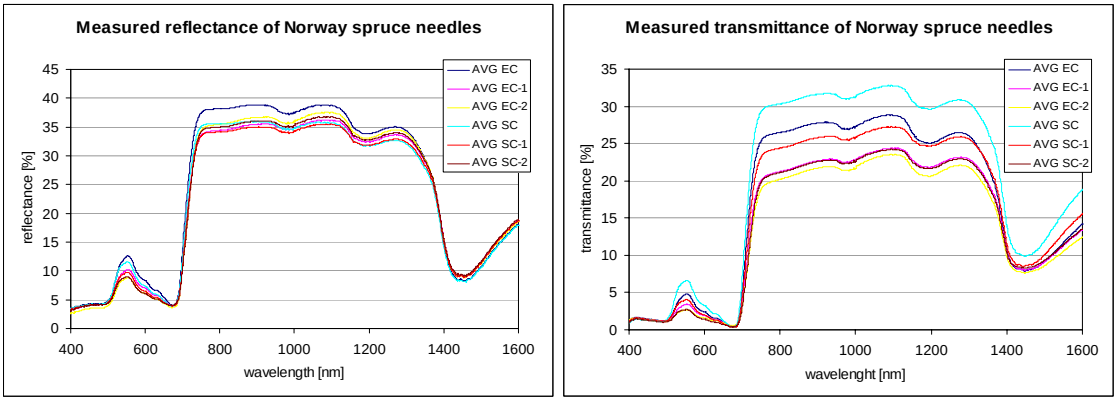


Figure III-7: Spectres de réflectance (gauche) et de transmittance (droite) direct-hémisphérique mesurés par le spectroradiomètre (FieldSpec Pro) pour les 3 dernières générations d'aiguilles (C, C-1, C-2) comprises dans les zones éclairée (EC) et à l'ombre (SC).

III.2.4 Images hyperspectrales AISA et prétraitement

L'instrument aéroporté AISA (spectroradiomètre imageur aéroporté) Eagle (Imageur Spectral, SPECIM Ltd., Finland) a permis d'acquérir le 18 septembre 2004 à 11:50 (GMT) plusieurs images hyperspectrales (*Figure III-8*) de la plantation étudiée. Ces images couvrent 64 bandes spectrales (largeur 10nm) entre 398.39 et 983.06 nm avec une résolution spatiale de 40cm. Elles ont été obtenues sous un ciel clair sans nuage avec une visibilité supérieure à 30km. Par rapport à l'éclairement solaire direct, la proportion de rayonnement diffus était donc négligeable (SKYL ≈ 0).

Les corrections radiométriques des images ont été réalisées avec le logiciel CaliGeo (Spectral Imaging, SPECIM Ltd., Finland), paramétré avec les coefficients d'étalonnage du capteur. Les corrections atmosphériques ont été effectuées en trois étapes. Tout d'abord, une méthode empirique (Smith & Milton, 1999) convertit les luminances au niveau du capteur en FRD. Elle nécessite au moins une cible d'étalonnage, dont la signature radiométrique doit être mesurée durant l'acquisition de

l'image (avec les mêmes conditions d'illumination). En pratique, cinq panneaux (2.5x2.5m) de calibration placés sur le sol, de réflectance lambertienne entre 5% (VIS) et 70% (PIR), sont utilisés (Clevers, 1988). Durant les passages du capteur AISA, leur FRD respectif est mesuré avec le spectroradiomètre ASD FieldSpec. La largeur du champ de vue (FOV = 29.9°) du capteur explique que les réflectances sont maximales sur les bords des images, parallèles à la ligne de vol.

Dans une deuxième étape, cette contrainte a conduit à convertir, avec l'outil ATCOR 4 (Richter & Schlapfer, 2002), les FRD mesurés en FRD "nadir", en s'appuyant sur une normalisation des réflectances par rapport aux réflectances nadirs. La qualité de ces corrections radiométriques a été testée sur trois cibles (*i.e.* argile, gravier et herbe), de dimension assez importante pour permettre la sélection (au sein d'une cible) d'un pixel AISA, très peu affecté par les pixels voisins des cibles environnantes.

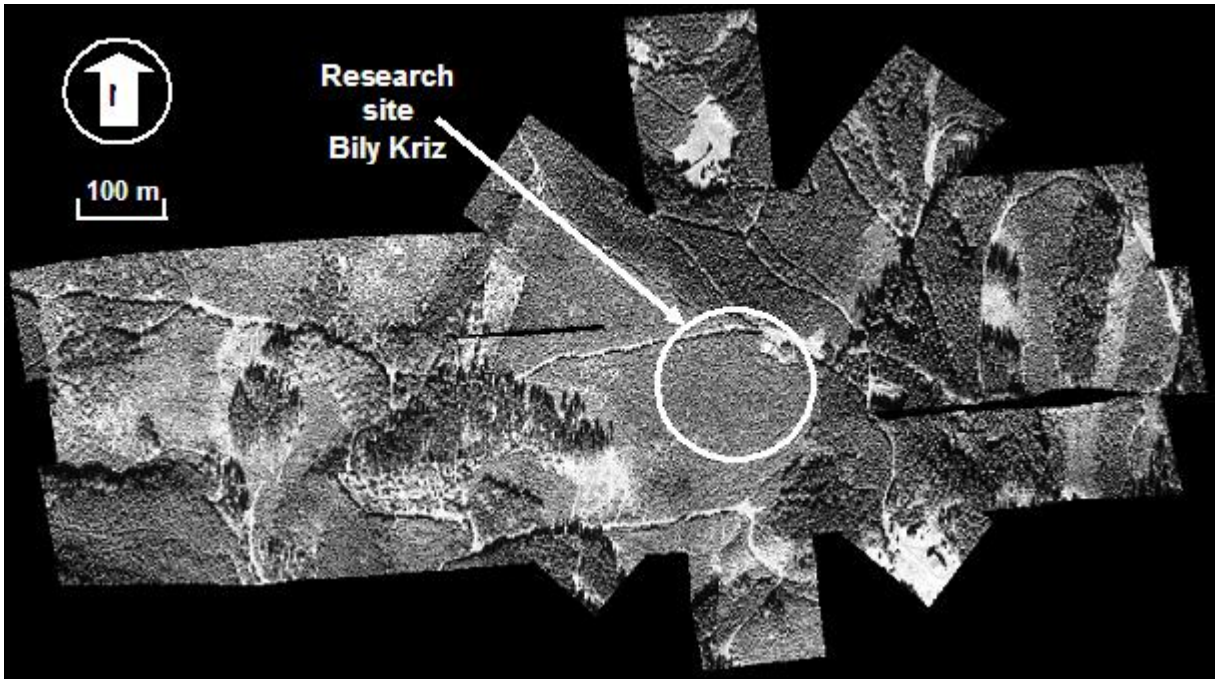


Figure III-8: Six axes de vols ortho-rectifiées du capteur aéroporté AISA Eagle sur le site de Bily Kriz (Monts Beskydy, République Tchèque; 18.54°E, 49.50°N, 936m d'altitude). Résolution spatiale : 40cm.

Finalement, les images AISA de FRD sont géo-orthorectifiées, en utilisant la projection géographique classique UTM, avec un MNT (Modèle Numérique de Terrain) de résolution verticale 2m et horizontale 40cm. Le géo référencement des images utilise l'outil de mesure inertiel (IMU) et le GPS du système embarqué. Dans le plan horizontal, la précision ainsi obtenue est de l'ordre de 1.2m (trois pixels).

III.2.5 Comparaison FRD DART vs. FRD AISA

Au total, 250 scènes par scénario sont simulées selon quatre bandes spectrales. Elles résultent de la combinaison de dix taux de couvertures (CC : 50-95%) et de vingt indices foliaires (LAI : 3-15$m^2.m^{-2}$), reflétant les valeurs minimales et maximales mesurées sur la zone d'étude (*Figure III-6*). Pour les comparer aux acquisitions AISA, les images DART sont simulées à 20cm de résolution (*Figure III-10*), puis re-échantillonnées à 40cm. Cette résolution particulièrement fine, combinée à une classification supervisée par maximum de vraisemblance (MLH), permet de distinguer précisément les pixels des houppiers "éclairés" et "à l'ombre" des zones de sol, les premiers étant facilement distinguables par leur fort FRD PIR, alors que les deuxièmes sont définis comme toute cellule du houppier qui n'interagirait pas avec le rayonnement solaire direct. Les pixels "houppier" sont utilisés pour déterminer le taux de couverture (CC), calculé comme le rapport du nombre de pixels "houppier" sur le nombre total de pixels au sol. La connaissance des LAI et des CC, permet la comparaison des FRD DART et AISA pour les trois scénarios, en différenciant :

- les FRD des pixels "houppier",
- les FRD des pixels houppier "éclairés",
- les FRD des pixels houppier "à l'ombre".

III.2.6 Indices de végétation (NDVI, AVI, GEMI) et directionnel (HDS)

Les indices de végétation sont des outils très utiles pour détecter, à partir d'un nombre réduit de mesures spectrales, le changement de propriétés physiques et/ou chimiques des objets observés (Bannari et al., 1995). Les modèles T-R offrent la possibilité de concevoir, tester et valider ces indices pour différentes résolutions spatiales, spectrales et directionnelles (Broge et Leblanc, 2001; Haboudane et al., 2002). Ici, l'influence de la prise en compte du bois est testée sur quatre indices de végétation. Trois indices sont des combinaisons linéaires de données spectrales au nadir :

- NDVI (Normalized Difference Vegetation Index),
- AVI (Angular Vegetation Index),
- GEMI (Global environmental monitoring index).

Le quatrième indice (HDS : Hot-Dark spot) est calculé à partir de mesures spectrales selon les directions de réflexion maximale (*hot spot*) et minimale (*dark spot*).

Le NDVI, conçu pour distinguer la végétation d'autres éléments comme le sol, la neige, l'eau ou les nuages (Rouse et al., 1973), est la différence normalisée des réflectances rouge (ρ_R) et proche-infrarouge (ρ_{PIR}) :

$$NDVI = \frac{\rho_{PIR} - \rho_R}{\rho_{PIR} + \rho_R} \quad \text{(III-2)}$$

Les premières études ont révélé une forte relation statistique entre le NDVI et le LAI (Jordan, 1969; Tucker, 1979). Toutefois, ces deux indices sont peu corrélés pour des couverts denses (Qi et al., 1994; Fassnacht et al., 1997; Turner et al., 1999; Lee et al., 2004) et/ou à haute résolution spatiale (Danson et al., 1994; Gascon et al., 2004).

Le second indice, AVI, est basé sur un concept angulaire défini entre les réflectances ρ_V (vert), ρ_R et ρ_{PIR} (Plummer et al., 1994) :

$$AVI = \frac{2}{\pi}.[\pi - (a_1 + a_2)] \quad \text{(III-3)}$$

$$\text{où} \quad a_1 = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1}\frac{\lambda_R.(\rho_{PIR} - \rho_R)}{\lambda_{PIR} - \lambda_R} \quad \text{et} \quad a_2 = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1}\frac{\lambda_R.(\rho_R - \rho_V)}{\lambda_R - \lambda_V} \quad \text{(III-4)}$$

Les trois longueurs d'onde utilisées sont : λ_V = 559nm, λ_R = 671nm et λ_{PIR} = 783nm. Cet indice, conçu au départ pour sa résistance aux effets du sol et de l'atmosphère (North, 2002), n'a pas été testé en présence de bois dans un couvert hétérogène simulé à THR.

Le troisième indice, GEMI (Pinty & Verstraete, 1992), non linéaire, permet de détecter l'état de la végétation en limitant les effets de l'atmosphère. Il est un des indices les moins sensibles aux variations du sol (Qi et al., 1994).

$$GEMI = \eta.(1 - 0.25.\eta) - \frac{\rho_R - 0.125}{1 - \rho_R} \quad \text{(III-5)}$$

$$\text{où} \quad \eta = \frac{2.(\rho_{PIR}^2 - \rho_R^2) + 1.5.\rho_{PIR} + 0.5.\rho_R}{\rho_{PIR} + \rho_R + 0.5} \quad \text{(III-6)}$$

L'indice directionnel HDS (Lacaze et al., 2002) est généré à partir de la différence normalisée entre les FRD maximal et minimal du plan principal, *i.e.* les FRD associés aux directions du *hot spot* (ρ_{HS}) et *dark spot* (ρ_{DS}) :

$$HDS = \frac{\rho_{HS} - \rho_{DS}}{\rho_{DS}} \quad \text{(III-7)}$$

Des études récentes (Chen et al., 2003; Lacaze et al., 2002) ont montré les liens existants entre l'indice HDS, la densité volumique foliaire et l'indice d'agrégation Ω_E (*clumping index* dans la terminologie anglaise). Ces relations ont été obtenues sur plusieurs biomes et notamment, sur différentes espèces de conifères, en combinant des données spatiales/aéroportées de l'instrument POLDER (Deschamps et al., 1994) et des simulations du modèle GHOST (Lacaze & Roujean, 2001).

III.3 RESULTATS ET VALIDATIONS

III.3.1 Paramétrisation de la forêt de conifères dans DART

Un compromis est réalisé pour modéliser l'architecture du houppier de manière "simple" (*i.e.* en accord avec la représentation du paysage de DART) et "réaliste" (*i.e.* proche de son apparence écologique). Pour atteindre cet objectif, les améliorations apportées concernent d'une part, la représentation informatique du paysage (*Figure III-9*) et, d'autre part, la modélisation du T-R. Ces améliorations doivent, en particulier, accroître la fiabilité et la précision des simulations THR de la parcelle de forêt. Ainsi, elles permettent de simuler les éléments de bois dans le houppier (*i.e.* troncs, branches, rameaux, *etc.*) en modélisant ou pas les "cellules mixtes". Ces dernières contiennent plusieurs éléments turbides (feuilles + brindilles) et/ou des surfaces opaques (tronc + branches) au sein de la même cellule (c*f.* chapitre I).

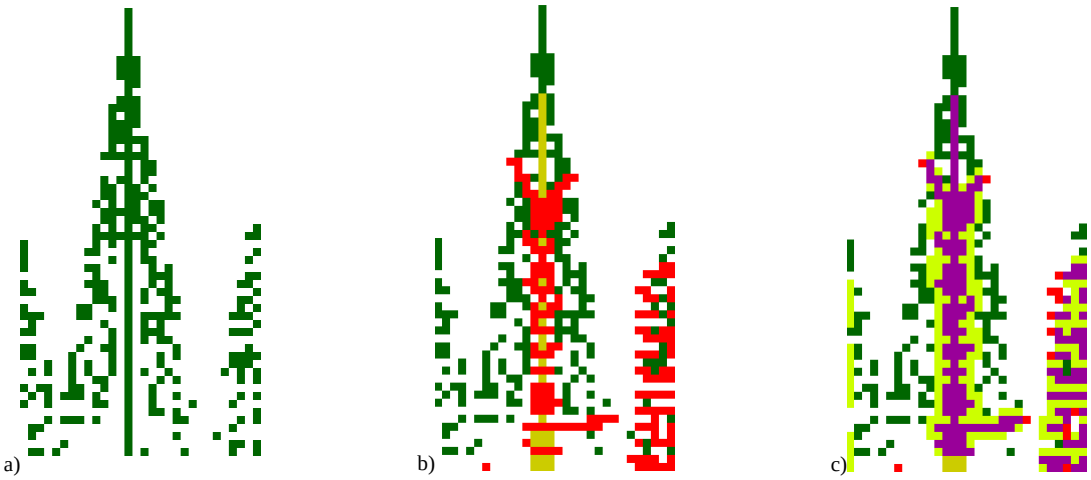


Figure III-9: Représentation schématique (cellules) en coupe d'un sapin de Norvège simulé par le module "maket" pour les 3 scénarios : F (a), FW (b), FWT (c). Chaque couleur caractérise un type de cellule : "Houppier" en vert, "Tronc" en marron, "Branche" en rouge, "Twig" ou "Twig + Houppier" en vert clair et "Mixte" en violet.

Un sapin de Norvège, modélisé par le module *Maket*, comprend désormais un tronc (*i.e.* superposition de 4 parallélogrammes verticaux fermés par 1 parallélogramme horizontal), d'où poussent des branches confinées dans un houppier conique. Ce dernier est rempli de cinq types d'éléments diffusants : troncs, branches, rameaux + brindilles, feuilles et trous :

(1) La construction du tronc à l'intérieur du houppier tient compte de sa structure hétérogène (*i.e.* ses propriétés optiques et géométriques varient suivant le niveau du houppier).

(2) Les branches du 1er ordre sont simulées par la juxtaposition de quatre triangles centrés selon un axe prédéfini de direction $\Omega_b(\theta_b;\phi_b)$.

(3) Les rameaux et brindilles (*i.e.* les branches de diamètres inférieur à 1cm) sont représentés par un milieu turbide caractérisé par ses propriétés optiques (réflectances et transmittance) et structurales (TAI : indice surfacique, TAD : distribution angulaire et u_t : densité volumique).

(4) La densité volumique foliaire u_f ou l'indice foliaire (LAI) à l'intérieur du houppier varie horizontalement et verticalement suivant une fonction de distribution linéaire. Le LAI spécifique à chaque espèce biologique est implémenté selon la définition de Chen & Black (1992) : la moitié de la surface foliaire par unité de surface au sol. Le terme TAI, similaire au LAI, est défini comme la moitié de la surface de l'ensemble "rameaux + brindilles" par unité de surface au sol.

(5) Enfin, la distribution horizontale et verticale des cellules turbides et/ou trous à l'intérieur du houppier simule l'agrégation des branches et les processus de défoliation, en accord avec les récentes avancées écophysiologiques sur la stratégie de croissance du sapin de Norvège (Gruber, 1994).

Le *Tableau III-3* résume les principaux paramètres utilisés par DART pour modéliser la parcelle du sapin de Norvège selon les trois scénarios (F, FW, FWT). Ils proviennent à la fois des mesures *in situ* de septembre 2004 et des données allométriques et écophysiologiques des arbres, recueillies pendant l'été 1997 (Pokorny et Marek, 2000).

Position solaire	*/Coordonnées réelles (dart)/*							
Angle zénithal	θ_s	[°]	47.8 (137.8)					
Angle azimutal	ϕ_s	[°]	176.5 (183.5)					
Bandes spectrales	*/½ Largeur de bande : FWHM = 10nm/*							
Vert	λ_V	[nm]	559					
Rouge	λ_R	[nm]	671					
Rouge décalé	λ_{RE}	[nm]	727					
Proche infrarouge	λ_{PIR}	[nm]	783					
Paramètres de la scène	*/parcelle de sapins de Norvège de 25 ans/*							
Taille des cellules	$\Delta x, \Delta y, \Delta z$	[m]	0.2, 0.2, 0.2					
Dimension de la scène	Dx, Dy	[m]	6.0, 6.0					
Indice foliaire (step)	LAI	[$m^2.m^{-2}$]	3-15 (0.5)					
Taux de couverture	CC	[%]	50-55	60-65	70-75-80	85	90	95
Nombre d'arbres			3	4	5	6	7	8

Tableau III-3: Paramètres DART pour générer les simulations multispectrales des 3 scénarios.

La configuration solaire (θ_s=47.8°; ϕ_s=176.5°) est calculée à partir de la position géographique du site d'étude (18.54°E, 49.50°N) ainsi que de l'heure et de la date des acquisitions aéroportées : 18 septembre 2004 à 11:50 a.m (GMT). Elle a été transformée pour respecter les conventions angulaires DART : θ_s=137.8° et ϕ_s=183.5°. La forêt est simulée au sein d'une matrice rectangulaire de surface horizontale de 6x6m^2 composée par la juxtaposition de cellules cubiques de 20cm de côté. La quantité d'arbres et leurs positions dans la scène varient selon le taux de couverture (CC) simulé (*Tableau III-3* et *Figure III-10*). Chaque arbre est défini par sa position (x, y) et ses dimensions exactes, ainsi que par

ses propriétés optiques et structurales. Chacun est associé à une espèce biologique permettant sa paramétrisation précise.

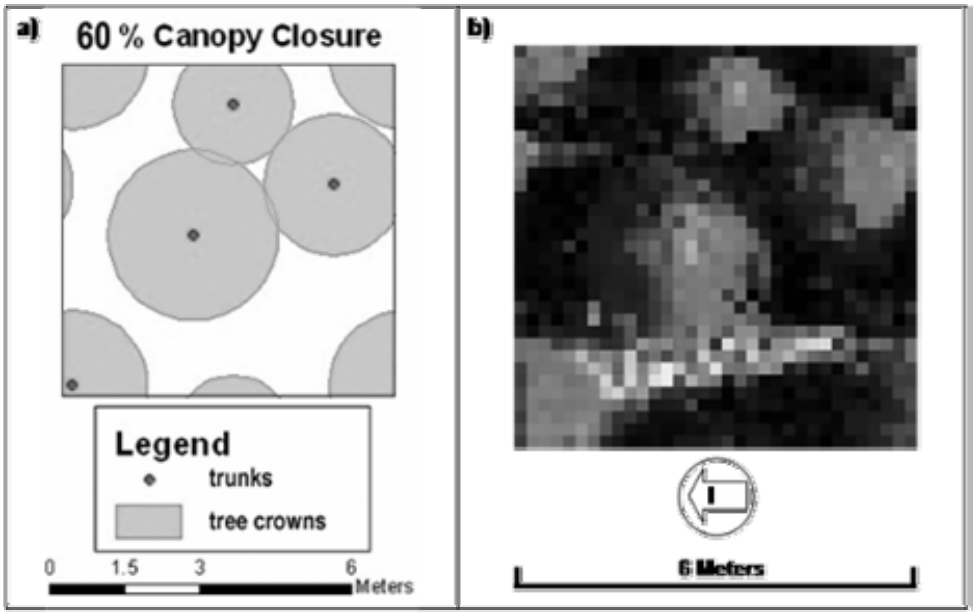


Figure III-10: a) Représentation schématique en vue de dessus d'une partie de parcelle de forêt avec un taux de couverture de 60% (4 arbres simulés); b) Image multispectrale noir et blanc associée simulées dans le vert, le rouge et le PIR (blanc : sol illuminé, gris clair : houppiers au soleil, gris foncé : houppiers à l'ombre, noir : houppiers et sol fortement à l'ombre).

Les caractéristiques allométriques des arbres (*e.g.* hauteur, dimensions des houppiers, *etc.*), dérivées des mesures destructives, reflètent les différents stades de croissance observés sur la parcelle (*Tableau III-4*). Les houppiers sont de forme conique, divisés en dix ou onze niveaux horizontaux pour lesquels deux niveaux consécutifs peuvent contenir des propriétés optiques foliaires identiques. La hauteur du tronc et ses diamètres sont définis pour chaque arbre en différenciant l'extérieur et l'intérieur du houppier. A l'intérieur, sa hauteur est spécifiée 2m au-dessous du sommet du houppier pour éviter toute influence non réaliste du tronc. Pour chaque niveau *l*, associé à une espèce foliaire *j*, $u_f[j,l]$ est distribuée suivant la distance de la cellule par rapport au tronc r(l) par 4 paramètres définis de manière relative : $\alpha(j,l)$, $\beta(j,l)$, $\gamma(j,l)$ et $\kappa(j,l)$. Ici, u_f est considérée croissante pour $r(l) \in [\alpha(j,l); \beta(j,l)[$, constante et ajustée par le poids w[j,l] pour $r(l) \in [\beta(j,l); \gamma(j,l)[$ et décroissante pour $r(l) \in [\gamma(j,l); \kappa(j,l)]$. La distribution horizontale des trous est définie aléatoirement entre a(j,l) et b(j,l) en spécifiant la proportion de cellules pleines p(j,l). Au-delà de ces limites, la défoliation est totale. La distribution horizontale des aiguilles est paramétrée suite à l'analyse de 24 branches issues des trois zones fonctionnelles du houppier (*i.e.* les zones basses, intermédiaires et hautes). Cette étude fournit des informations sur l'agrégation du feuillage autour des branches, *i.e.* la distribution spatiale des trous entre les rameaux (défoliation en forme de mosaïque) ainsi que les zones totalement défoliées (au cœur de houppier). La distribution angulaire foliaire suit une loi ellipsoïdale (Campbell, 1990) avec un angle moyen (ALA) qui varie en fonction du niveau dans le houppier. ALA est fixé à 25° pour les

deux niveaux supérieurs, entre 30° et 35° pour la zone intermédiaire et à 40° pour les quatre niveaux inférieurs. Les valeurs de ALA sont une combinaison de la distribution angulaire des aiguilles le long des brindilles et de ces derniers dans le houppier. Pour représenter deux verticilles par niveau horizontal *l*, quatre à six branches du 1er ordre sont simulées avec θ_b qui décroît de 90° à 60° avec la hauteur du houppier. L'ensemble "rameaux + brindilles" est spécifié dans un rayon de 20cm autour des axes des branches du 1er ordre avec un ALA fixé à 35° sur tout le houppier.

Paramètres des arbres	**Identifiants**	**Unités**	**Valeurs (écarts types)**
Hauteur totale		[m]	10.45 (0.88)
Tronc sous le houppier			
Hauteur	$H_{T,b}$	[m]	0.38 (0.13)
Diamètre	$\varnothing_{T,b}$	[m]	0.17 (0.02)
Tronc à l'intérieur du houppier			
Hauteur	$H_{T,w}$	[m]	8.08 (0.76)
Diamètre relatif	$\varnothing_{T,w}$	[relative]	0.41 (0.03)
Houppier			
Type			Conique
Hauteur	H_c	[m]	10.08 (0.76)
Rayon inférieur		[m]	1.60 (0.24)
Rayon intermédiaire		[m]	1.54 (0.24)
Rayon supérieur		[m]	0.00
Nombre de niveaux	L		10
Hauteur relative d'un niveau	%h	[relative]	0.09
Distribution horizontale des feuilles			
α	α	[relative]	0.00
β	β	[relative]	0.34
γ	γ	[relative]	0.63
κ	κ	[relative]	1.00
Distribution des trous			
a	a	[relative]	0.15
b	b	[relative]	1.00
% de cellules pleines	p	[%]	48.00
Structures			
Angle foliaire moyen	ALA	[°]	34 (7)
Indice foliaire "rameaux+brindilles+aiguilles"	TAI	$[m^2.m^{-2}]$	0.082 (0.017)
Angle foliaire moyen "rameaux+brindilles+aiguilles"	ATA	[°]	35

Tableau III-4: Paramètres structuraux des arbres simulés.

Les propriétés optiques (*i.e.* réflectance et transmittance direct-hémisphérique) des aiguilles classées par génération sont calculées à partir de leur distribution dans sept zones du houppier (*Figure III-11-a*). La réflectance des troncs est calculée comme la moyenne de cinq mesures de FRD effectuées sur l'écorce. Du fait de leur forme cylindrique très étroite, les propriétés optiques des brindilles et rameaux n'ont pu être mesurées. Ces éléments ont été simulés en tant que milieu turbide avec une transmittance nulle ($\tau_t = 0$) et une réflectance égale à celle des branches du 1er ordre (*Figure III-11-b*). Étant donné l'absence de végétation dans le sous-bois, le FRDH du sol est spécifié en moyennant les réflectances des aiguilles sénescentes (litière) et du sol nu.

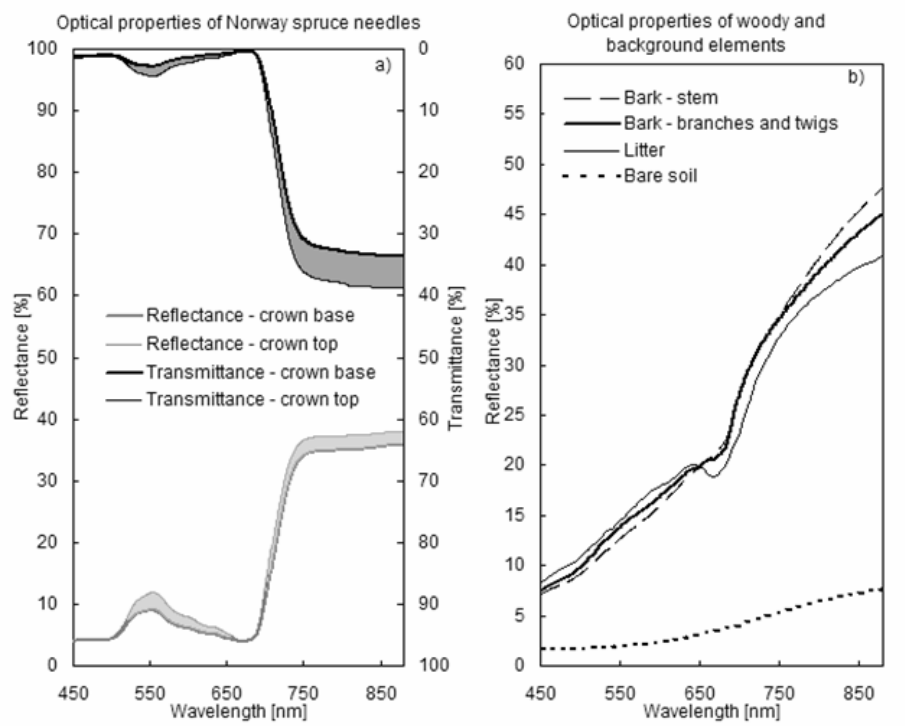


Figure III-11: Propriétés optiques mesurées (réflectance et transmittance direct-hémisphérique) des différents éléments utilisés pour paramétrer DART : a) Réflectance (échelle de gauche) et transmittance (échelle de droite) spectrales des aiguilles du sapin de Norvège définies suivant 7 zones du houppier de la base au sommet. b) Réflectance des éléments de bois (écorce, branches et brindilles) et du sol (litière et sol nu).

III.3.2 Validation des FRD DART

- ***Corrections atmosphériques***

La qualité de la correction atmosphérique des images a été testée avec des mesures de réflectance au sol, acquises sur trois cibles naturelles : couvert argileux, gravier et prairie. Ces mesures sont réalisées au nadir avec un spectroradiomètre ASD FieldSpec Pro, dans les mêmes conditions d'illumination que les acquisitions AISA. La taille des cibles et la résolution spatiale des images AISA permettent l'extraction de leur FRD sans effets radiométriques majeurs des objets voisins. Deux surfaces, composées d'éléments naturels, présentent un bon accord entre les mesures *in situ* et les données aéroportées. L'erreur quadratique moyenne (RMSE) calculée pour 39 bandes spectrales entre 450 et 800nm atteint : 0.23% pour le sol argileux et 0.18% pour le gravier (*Figure III-12*-abcd). Les écarts les plus importants (RMSE = 3.16%) sont obtenus pour la végétation (*Figure III-12*-ef), dans le PIR (λ > 740nm). Il est, en effet, observé une sous-estimation des FRD PIR mesurés sur la cible de végétation, de l'ordre de 4%. Étant donné la structure homogène de la végétation, ces divergences peuvent s'expliquer par la variation de ses propriétés structurales (LAI et LAD) entre les acquisitions et les mesures. En effet, une variation de ces deux paramètres pourrait influencer fortement la réflectance PIR de la prairie.

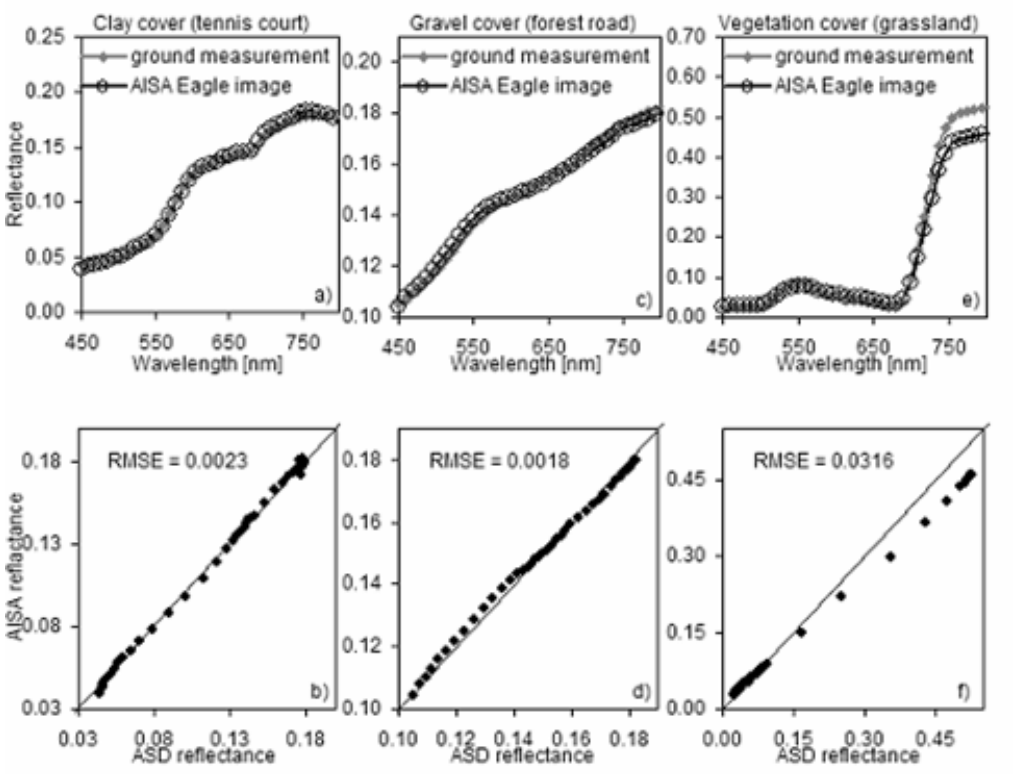


Figure III-12: Validation des corrections atmosphériques par comparaison des mesures de réflectance réalisées sur 3 types de surface naturelle et urbaine : couvert argileux (court de tennis : a, b), gravier (chemin forestier : c, d) et végétation (prairie : e, f).

- ***Comparaisons FRD DART vs. AISA***

La *Figure III-13* illustre, pour les trois scénarios, les comparaisons des FRD DART *vs.* AISA extraits des 12 matrices décrites *Figure III-6*. De manière générale, les différences augmentent avec le niveau radiométrique moyen des pixels observés. Malgré leur plus forte variabilité radiométrique (*Figure III-13*-cfi), les plus faibles RMSE (*Tableau III-5*) sont atteints pour les pixels des houppiers "à l'ombre" alors que les plus forts RMSE sont observés pour les pixels "éclairés". En effet, ces derniers (*Figure III-13*-beh) possèdent des réflectances deux fois plus importantes que celles des pixels "à l'ombre". Les pixels "houppier" (*Figure III-13*-adg) présentent les mêmes tendances, au vu de leur niveau radiométrique moyen plus proche de celui des pixels "éclairés". Excepté pour λ = 671nm, les écarts les plus faibles sont observés pour le scénario FWT. Les FRD DART, simulés pour les scénarios F et FW sont systématiquement supérieurs. Les simulations PIR exhibent les écarts maximaux alors que les simulations dans le domaine spectral du rouge exhibent les écarts minimaux. Les RMSE (%) atteignent pour les pixels "houppier"/"éclairés"/"à l'ombre" : 3.5/5.35/2.26 (F), 2.31/3.71/1.79 (FW) et 1.35/1.23/1.89 (FWT). Dans le rouge, ces valeurs diminuent à : 0.21/0.09/0.43 (F), 0.23/0.1/0.42 (FW) et 0.77/1.08/0.48 (FWT).

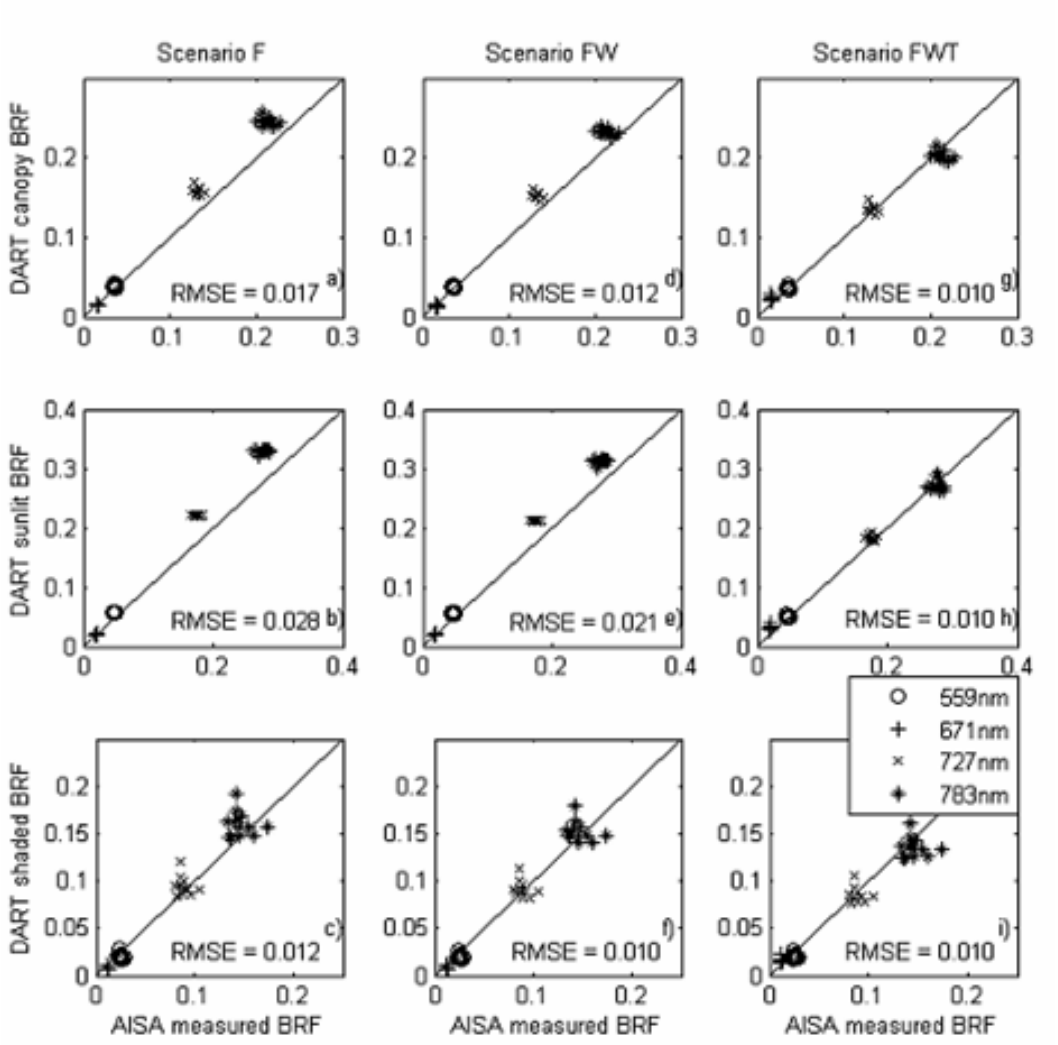


Figure III-13: Comparaison des FRD DART vs. AISA (obtenus sur les 12 zones échantillonnant la parcelle) pour les pixels "houppier" (a, d, g), "éclairés" (b, e, h) et "à l'ombre" (c, f, i). 3 scénarios (F : a, b, c; FW : d, e, f; FWT : g, h, i). 4 longueurs d'onde : 559-671-727-783nm.

Les comparaisons au nadir des FRD DART vs. AISA extraits de douze patchs de forêt simulés suivant quatre bandes spectrales révèlent un meilleur accord pour le scénario FWT (*Tableau III-5*). Toutefois, les deux autres scénarios présentent aussi des écarts assez faibles. Le RMSE maximal (5.35%) est atteint dans le PIR (λ = 783nm) pour les pixels "éclairés" du scénario F. Il est bien sûr admis que ces différences restent très dépendantes de la fiabilité des méthodes employées pour corriger les images des effets radiométriques et atmosphériques. Néanmoins, ces incertitudes sont minimisées par l'approche de correction/calibration utilisée ici : trois cibles avec des propriétés optiques bien distinctes couvrant la gamme des réflectances relevées sur la parcelle forestière. Cette technique permet en effet d'obtenir des RMSE relativement faibles sur deux types de surface : 0.23% sur sol argileux et 0.16% sur gravier. Les seules divergences notables apparaissent dans le PIR pour la parcelle de végétation (RMSE = 3.16%).

RMSE [%]	Domaines spectraux [nm]			
	559	***671***	***727***	***783***
Pixels "houppier"				
F	0.35	0.21	2.67	3.50
FW	0.27	0.23	2.08	2.31
FWT	0.27	0.77	0.83	1.35
Pixels "éclairés"				
F	1.05	0.09	4.57	5.35
FW	0.84	0.10	3.62	3.71
FWT	0.39	1.08	1.15	1.23
Pixels "à l'ombre"				
F	0.61	0.43	1.41	2.26
FW	0.60	0.42	1.24	1.79
FWT	0.55	0.48	1.17	1.89

Tableau III-5: RMSE calculés entres les FRD AISA extraits des 12 matrices et les FRD DART simulés pour les 3 scénarios en différenciant les pixels "houppier", "éclairés" et "à l'ombre". 4 domaines spectraux : 559-671-727-783nm.

Nonobstant le très bon accord entre les FRD AISA, extraits de 12 patchs de forêt, et les FRD DART simulés pour le scénario FWT, ces derniers sont surestimés dans le rouge. Ce problème peut être dû à une paramétrisation imprécise des propriétés optiques de l'ensemble "rameaux + brindilles". En effet, ces dernières sont supposées identiques à celles des branches du 1er ordre et uniformes quelle que soit la position des "rameaux + brindilles" dans le houppier. Il est possible que les propriétés optiques des algues vertes et les lichens épiphytes, dispersés irrégulièrement à travers la canopée sur l'écorce des branches et des rameaux, jouent un rôle majeur. Leur structure interne pourrait très bien, n'influencer que sensiblement les mécanismes de diffusion dans le PIR et accentuer fortement, grâce à leurs pigments chlorophylliens, l'absorption du rayonnement dans le rouge. Pour ce domaine spectral, la prise en compte des lichens et algues vertes devrait réduire la surestimation du rayonnement réfléchi. Cette étude pourrait déboucher sur l'introduction d'éléments bio-indicateurs particulièrement intéressants, étant donné leur sensibilité à la pollution de l'air.

III.4 INFLUENCE DES ELEMENTS LIGNEUX DANS LE HOUPPIER

III.4.1 Comparaison des FRD

- ***Réflectance des houppiers : Effets au nadir***

De manière générale, les FRD "houppier", extraits des images DART pour les trois scénarios (*Figure III-14*), diminuent avec l'augmentation du LAI quel que soit le domaine spectral. La principale explication réside dans l'augmentation de la densité volumique foliaire qui diminue la transmittance des houppiers réduisant ainsi les flux provenant des parties basses des houppiers et du sol. Cette diminution survient malgré l'augmentation de la réflectance des couronnes éclairées, due à l'augmentation du LAI (*Figure III-14*), conte tenu du fait, que le rayonnement réfléchi au dessus de la canopée, résulte surtout de la somme de deux composantes :

- (1) "D2H" : Réflexion des zones éclairées des houppiers (plutôt des parties hautes) associée principalement au rayonnement solaire direct;

- (2) "SBH" : Réflexion du sol et des houppiers à l'ombre atténuée par les houppiers voisins et/ou au-dessus, à la fois au niveau de leur éclairement et de la transmittance du rayonnement qu'ils réfléchissent.

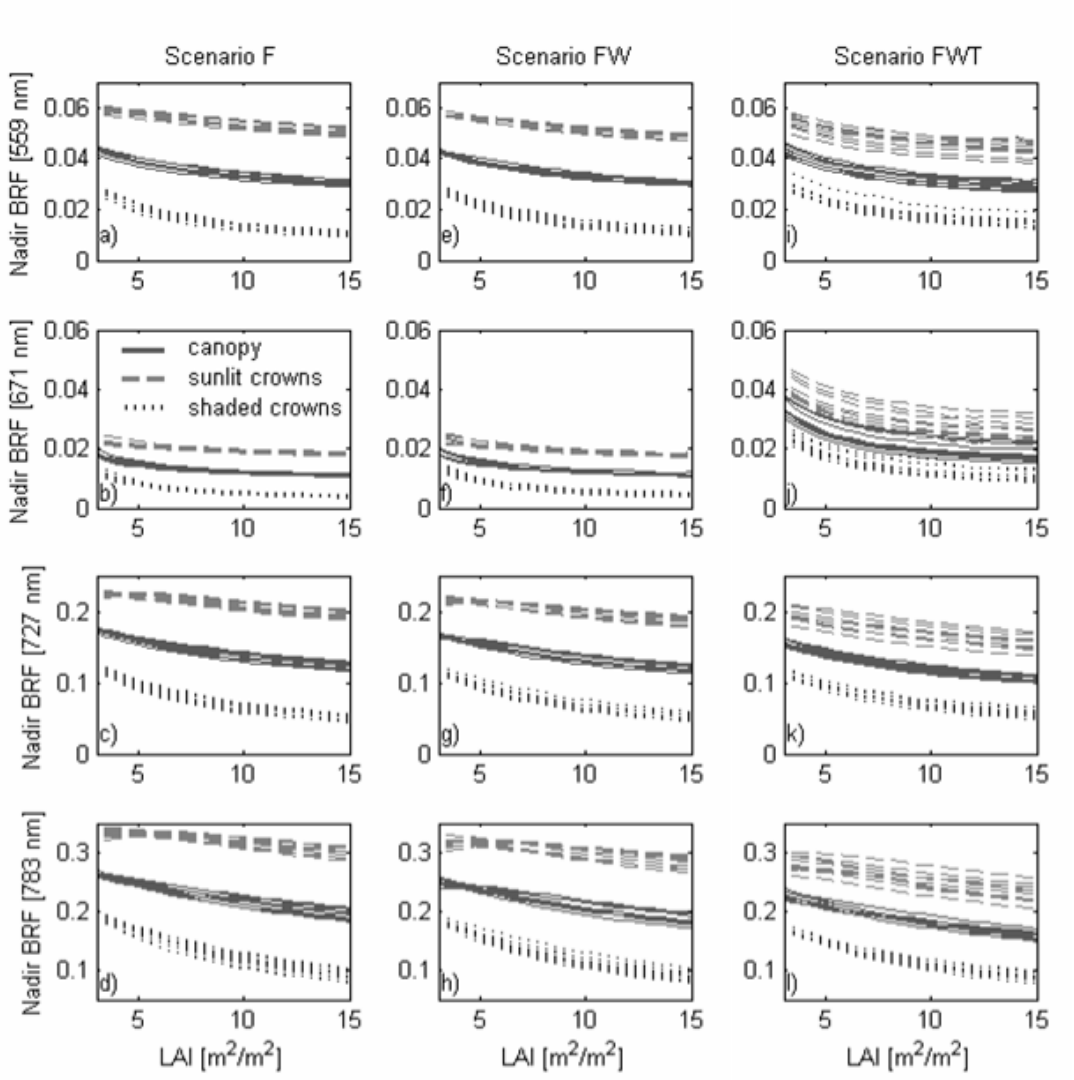


Figure III-14: Comparaison pour les 3 scénarios des relations FRD DART-LAI simulés au nadir à 559, 671, 727 et 783nm pour 10 CC (55-95%). La classification MLH au sein des images permet de différencier les FRD des pixels "houppier", "éclairés" et "à l'ombre".

Pour le scénario F (*Figure III-14*-abcd), les FRD nadirs des pixels houppiers "éclairés" varient suivant les LAI et CC : 5-6% dans le vert (V), autour de 2% dans le rouge (R), 19-23% pour λ = 727nm (RE) et 29-35% dans le PIR. Comme attendu, les plages de variation des réflectances des pixels "à l'ombre" sont plus faibles : 1-3% (V), 0.5-1% (R), 5-12% (RE) et 5-20% (PIR). Les FRD des pixels "houppier" se situent entre les 2 classes de pixels précédents. Ils oscillent autour de 3-5% (V), 1-2% (R), 11-18% (RE) et 20-27% (PIR). Quel que soit le domaine spectral, la variabilité des FRD au CC est largement plus faible que celle due au LAI.

L'introduction des branches du 1er ordre pour le scénario FW (*Figure III-14*-efgh), diminue principalement les FRD nadirs aux faibles LAI avec des différences relatives qui atteignent 6% dans le PIR.

Les écarts s'accentuent avec le scénario FWT (*Figure III-14*-ijkl). La modélisation plus précise de l'architecture des houppiers notamment par la simulation des cellules mixtes, entraîne une plus grande variabilité au CC pour tout LAI en particulier pour les FRD des pixels "éclairés". Ces derniers varient en fonction du domaine spectral. Leurs valeurs radiométriques augmentent fortement jusqu'à 3-5% (R), et diminuent jusqu'à 4-6% (V), 15-20% (RE) et 20-30% (PIR). Les FRD des pixels "à l'ombre" évoluent plus sensiblement avec, toutefois, des variations absolues autour de 1% (R-RE) et 3% (V-R-PIR). Finalement, les FRD nadirs des pixels "éclairés" et "à l'ombre" ont les mêmes tendances : diminution sensible dans le vert, rouge décalé et PIR et forte augmentation dans le rouge.

Pour λ=783nm, l'analyse des FRD nadirs des pixels "éclairés" et "à l'ombre" (*Figure III-15*), révèlent :

- Les courbes "FRD-LAI" des scénarios F et FW ne sont pas uniquement monotones décroissantes mais présentent aussi une forme concave, notamment pour les parcelles simulées avec les caractéristiques structurales suivantes : LAI < $8m^2.m^{-2}$ et CC > 55%. Ce comportement atypique associe un même FRD à plusieurs LAI (*Figure III-15*-ac). Ainsi, pour CC = 95%, des LAI de 4 et $10m^2.m^{-2}$ génère un FRD nadir identique. Ce même phénomène est observé pour toutes les longueurs d'onde simulées (559nm, 727nm, 736nm, 745nm, 755nm et 764nm), excepté dans le rouge (671nm). Dans ce domaine spectral, vu les propriétés optiques des différents éléments constituants le couvert, avec en particulier une forte absorption des pigments chlorophylliens, le rayonnement prépondérant provient du sol. De fait, quand les LAI et les CC augmentent, les zones de sol éclairé diminuent, entraînant une décroissance continue de la réflectance. Ces résultats sont en accord avec les observations de Gerard & North (1997) et Brown et al. (2000). Ces courbes concaves s'expliquent par la prédominance d'une ou l'autre des deux composantes du rayonnement "D2H" et "SBH". En effet, pour les faibles densités foliaires, l'augmentation du LAI tend à accroître "D2H" et diminuer "SBH" jusqu'à ce que la décroissance de cette dernière devienne prépondérante par rapport à l'accroissement de la première. Ce phénomène n'est pas visible sur les couverts épars (CC = 55%) car la composante dominante est issue du rayonnement diffusé par les parties basses des houppiers et du sol même si, dans ce cas, les ombres tendent à couvrir le sol plutôt que les houppiers des arbres voisins. Cette influence prépondérante du sol pour les couverts épars est consistante avec les analyses de Gerard & North (1997) et de Rautiainen et al. (2004).
- L'introduction du bois entraîne une diminution des FRD nadirs des pixels "éclairés" et une augmentation des FRD nadirs des pixels "à l'ombre", avec un impact d'autant plus marqué

que le CC est fort. En effet, un accroissement du CC tend à augmenter les diffusions multiples, et donc, à réduire les différences radiométriques entre les FRD des pixels "éclairés" et "à l'ombre". Les FRD nadirs des pixels "à l'ombre" sont aussi moins sensibles aux variations des LAI et CC.

- L'introduction des cellules mixtes (scénario FWT) diminue les FRD PIR, et, supprime la concavité des courbes "FRD-LAI", en annihilant l'augmentation des FRD pour les faibles LAI (*Figure III-15*-e). Ceci est principalement dû à la diminution de la transmission du flux "SBH" étant donné la transmittance très faible des "rameaux + brindilles + aiguilles". Les FRD des pixels "à l'ombre" chutent de manière monotone en fonction du LAI (*Figure III-15*-bdf). Leurs signatures radiométriques sont moins sensibles à l'introduction du bois, excepté pour les faibles LAI des couverts épars. Dans ces conditions, les différences relatives atteignent 6% pour FW et 12% pour FWT.

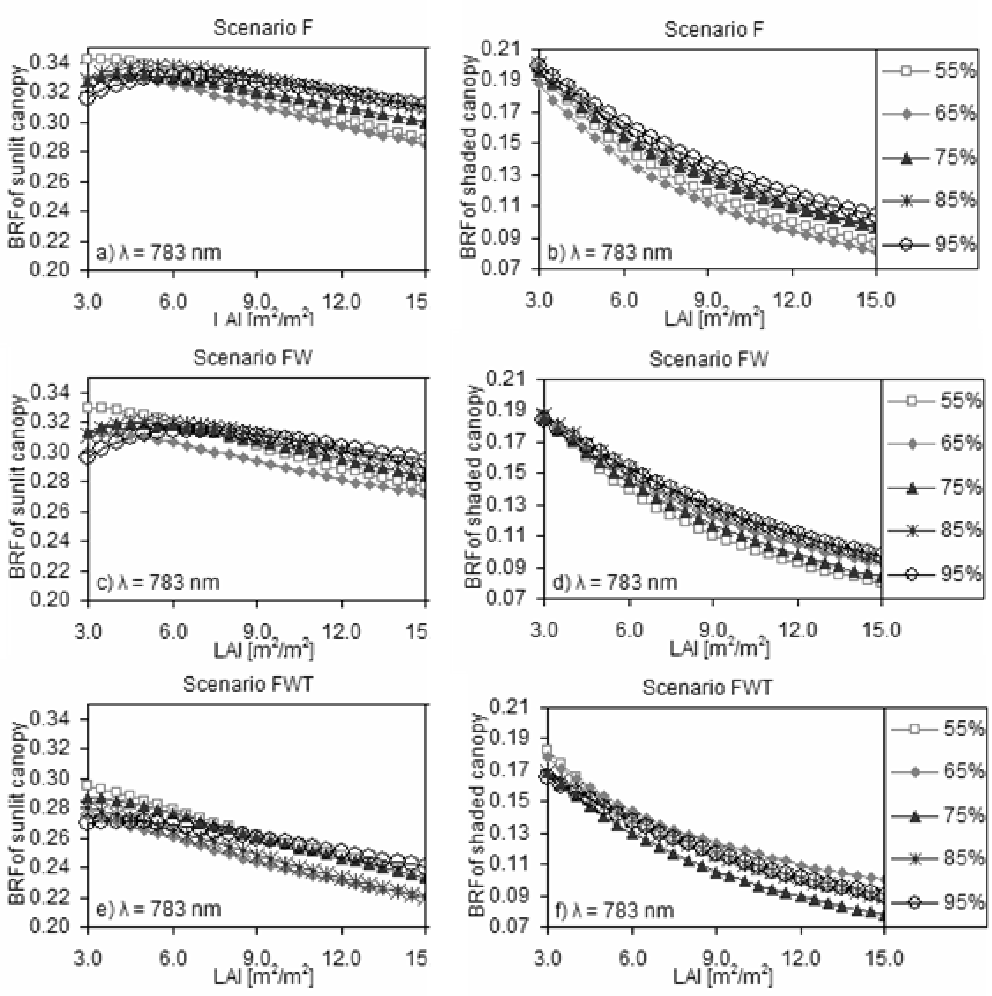


Figure III-15: Variations des FRD nadirs des pixels "éclairés" et "à l'ombre" selon le LAI de la parcelle pour les 3 scénarios : F, FW, FWT. λ = 783nm. CC = 55, 65, 75, 85 et 95%.

En résumé, nonobstant la proportion de bois largement inférieure à celle de la biomasse foliaire (respectivement 13% et 87%), ces simulations révèlent un impact important du bois sur la réflectance au nadir avec notamment, des effets plus marqués concernant :

- les couverts épars avec des LAI plus faibles et,
- l'introduction de l'ensemble "rameaux + brindilles + aiguilles" simulé en tant que cellules mixtes, comparé aux éléments de bois (troncs, et branches du 1er ordre) modélisés uniquement par la juxtaposition de surfaces opaques.

La prise en compte du bois dans les houppiers diminue les FRD PIR malgré des réflectances élevées, mesurées dans le PIR au niveau des écorces. Ces résultats sont en accord avec ceux de Myneni et al. (1997). Un effet opposé est observé dans le rouge, où l'augmentation relative des FRD par rapport au scénario F peut atteindre 10% (FW) et 50% (FWT). Ces différences résultent des fortes réflectances associées aux "rameaux + brindilles" ($\rho_t \approx 25\%$), qui combinées à la forte absorption des pigments foliaires, rehaussent les FRD rouge. La forme des courbes "FRD nadirs-LAI" des pixels "à l'ombre" reste moins influencée par l'introduction du bois que celle des FRD des pixels "éclairés", vu leur niveau radiométrique plus faible. Néanmoins, les variations relatives sont plus importantes. Pour ces 2 zones, les plus forts écarts sont observés dans le rouge.

Pour tenir compte de l'agrégation spécifique des houppiers de conifères, Smolander & Stenberg (2003) modélisent les mécanismes des diffusions multiples au sein de l'ensemble de diffuseurs élémentaires "brindilles + aiguilles". Cette correction introduite dans le modèle de réflectance de forêt PARAS (Smolander & Stenberg, 2005) tend à améliorer la précision des FRD de forêts de conifères en diminuant les réflectances rouge et PIR. Néanmoins, ce modèle utilise de nombreuses hypothèses simplificatrices : il néglige notamment, plusieurs phénomènes physiques majeurs tel que le *hot spot*, les diffusions multiples entre les arbres et le sol, ainsi que les groupements des houppiers. L'approche de modélisation développée ici, basée sur les cellules mixtes, permet de prendre en compte la mixité de matière au sein d'une même cellule. Elle améliore donc la modélisation des diffusions multiples notamment, dans les milieux très agrégés. Toutefois, la représentation utilisée (*i.e.* milieux turbides + surfaces opaques) est localement moins précise que celle utilisée par le modèle hybride (*i.e.* géométrique + Monte Carlo) simulant les intéractions (Smolander & Stenberg, 2003) "photon - diffuseur" (*e.g.* aiguilles). Par contre, elle présente l'avantage majeur d'être généralisable à tout type de canopée. Nous pouvons noter que l'approche de Smolander & Stenberg et la modélisation des cellules mixtes donnent sensiblement les mêmes tendances, avec une diminution des FRD PIR. Ces 2 méthodes ne sont pas contradictoires mais complémentaires car elles permettent d'affiner la représentation des mécanismes d'intéractions électromagnétiques au sein des houppiers.

La partie suivante est consacrée aux effets directionnels de l'introduction du bois sur les FRD.

- ***Réflectance totale : Effets directionnels***

Afin d'évaluer l'impact du bois sur la distribution directionnelle de la réflectance du sapin de Norvège, l'étude se focalise sur les 2 couverts extrêmes rencontrés sur la parcelle d'étude : CC = 55% et 95%. 5 LAI sont testés pour rendre compte de la forte variabilité de l'indice foliaire, détectée sur les mesures *in situ* : 3, 6, 9, 12 et 15$m^2.m^{-2}$. Ce travail s'articule en 2 parties complémentaires :

(1) La première se concentre sur la comparaison dans le plan principal les FRD des 3 scénarios simulés dans le vert (559 nm), le rouge (671nm) et le PIR (784nm).

(2) La deuxième est consacrée à l'évaluation des différences relatives entre scénarios sur toutes les directions, pour les 2 longueurs d'onde d'intérêt majeur en télédétection : le rouge et le PIR.

Cette étude permet de quantifier notamment les effets de la prise en compte du bois par rapport à une simulation dite "classique" avec des houppiers uniquement composés d'éléments turbides. Elle concerne l'impact (i) lié à l'introduction des troncs et branches du 1er ordre pour le scénario FW et à (ii) la prise en compte, par l'intermédiaire des cellules mixtes, de la simulation des rameaux et brindilles (autour des branches), pour le scénario FWT.

a) <u>Plan Principal :</u> $\theta_v \in [0; 60°]$ $\varphi_v = 3.5°$ et $\varphi_v = 183.5°$

Les FRD générés sur les couverts épars (CC = 55%; *Figure III-16*) et dense (CC = 95%; *Figure III-17*) montrent plusieurs tendances :

- Par rapport aux houppiers "classiques", l'introduction du bois dans la canopée tend à augmenter les FRD vert et rouge et à diminuer les FRD PIR. Son impact est d'autant plus marqué que le LAI est faible et quel que soit le couvert : épars (visible) ou dense (PIR).
- L'introduction des troncs et des branches du 1er ordre augmente les FRD rouge (*Figure III-16*-efgh), et dans une moindre mesure les FRD vert (*Figure III-16*-abcd) du couvert épars sur toutes les directions. Cette augmentation est très sensible pour le régime de rétrodiffusion du couvert dense (*Figure III-17*-abcdefgh). Dans le PIR, une diminution des FRD est observée, avec des effets proportionnels à θ_v, vu l'accroissement du rayonnement intercepté par les éléments opaques (troncs et branches).
- La simulation de l'ensemble "rameaux + brindilles + aiguilles", par l'intermédiaire des cellules mixtes, exhibe les mêmes tendances avec un impact plus marqué, notamment dans le rouge.
- Pour λ = 671nm, la simulation du bois accentue la pente des FRD autour du nadir augmentant, par rapport à l'ordre 1, la proportion des diffusions multiples.
- La forme du pic de *hot spot* (en particulier sa hauteur) est influencée par l'introduction du bois : amplification (rouge et vert) et diminution (PIR).

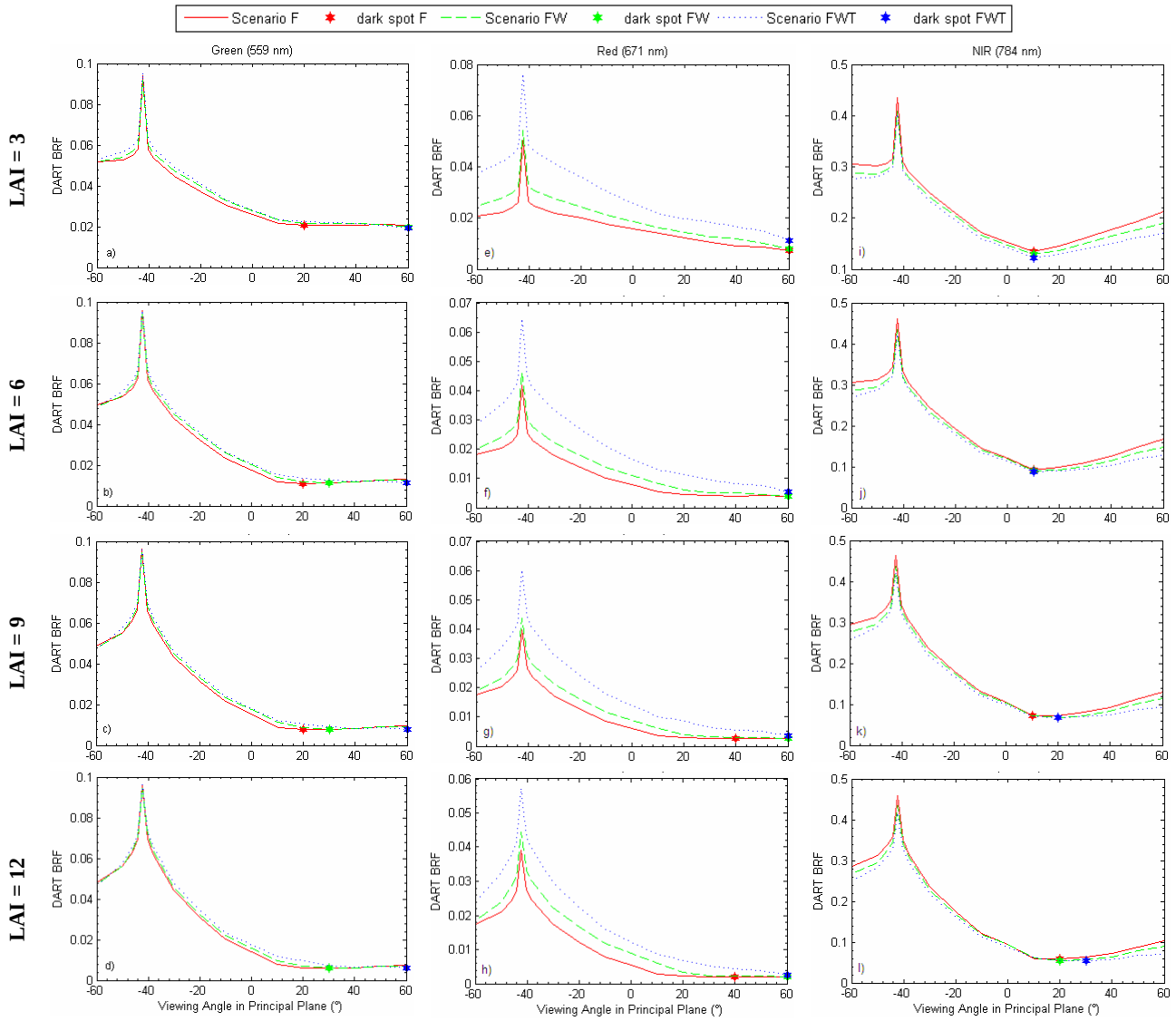
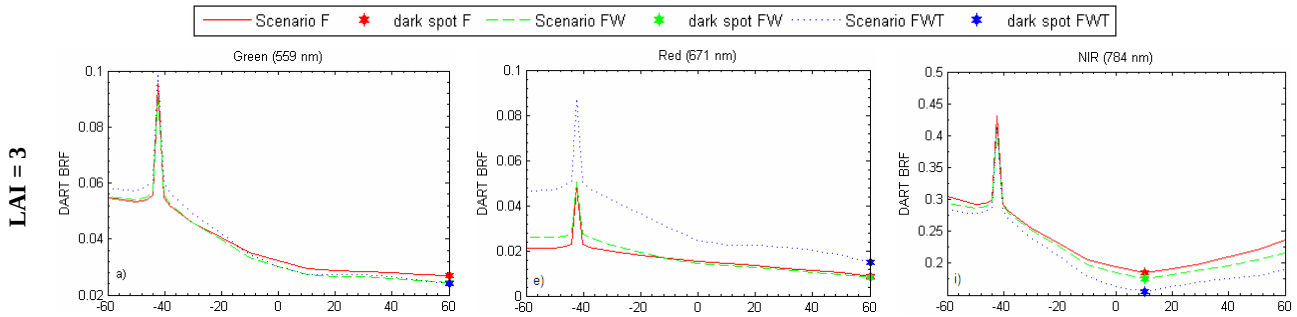


Figure III-16: Comparaison des FRD simulés dans le plan principal. 3 scénarios (F: rouge; FW : vert; FWT : bleu). λ = 559, 671 et 784nm. 4 LAI : 3 (aei), 6 (bfj), 9(cgk) et 12 (dhl). CC = 55%.



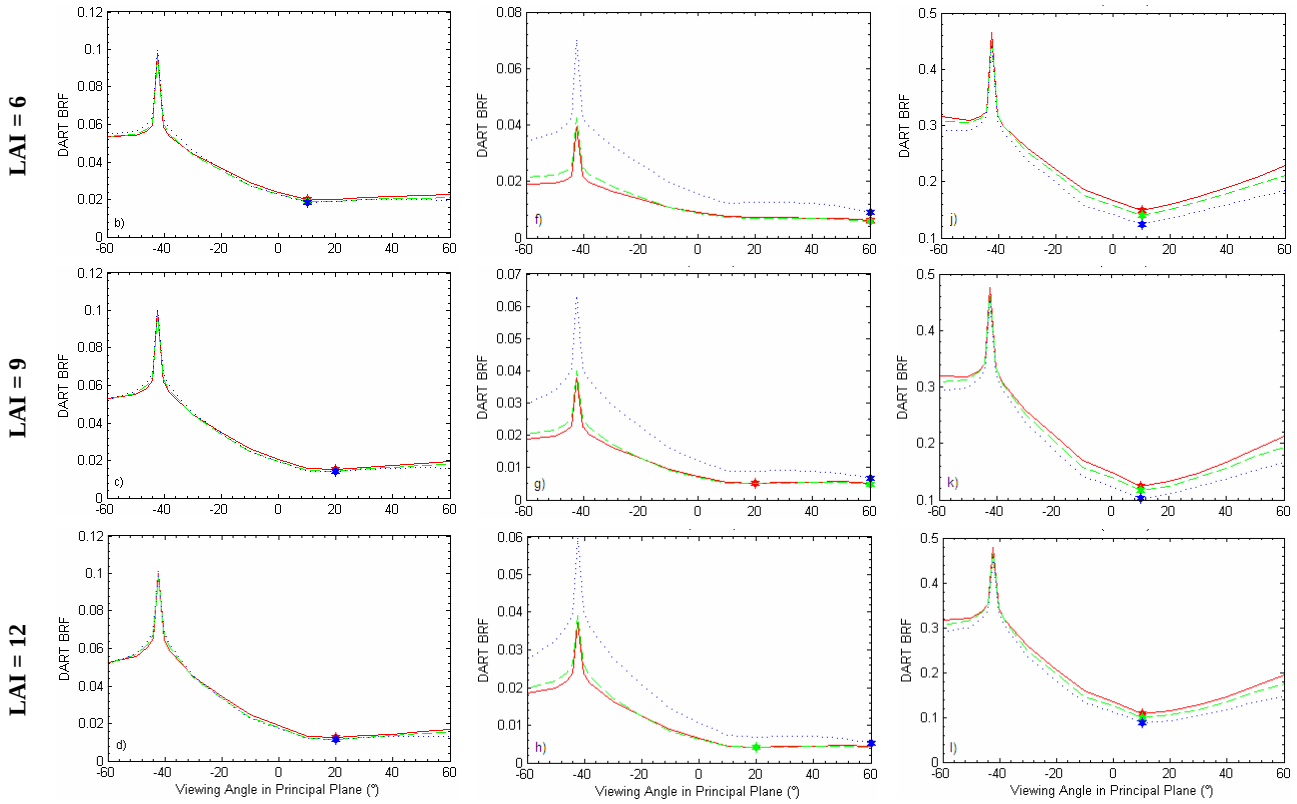


Figure III-17: Comparaison des FRD simulés dans le plan principal. 3 scénarios (F : rouge, FW : vert; FWT : bleu). λ = 559, 671, et 784nm. 4 LAI : 3 (aei), 6 (bfj), 9(cgk) et 12 (dhl). CC = 95%.

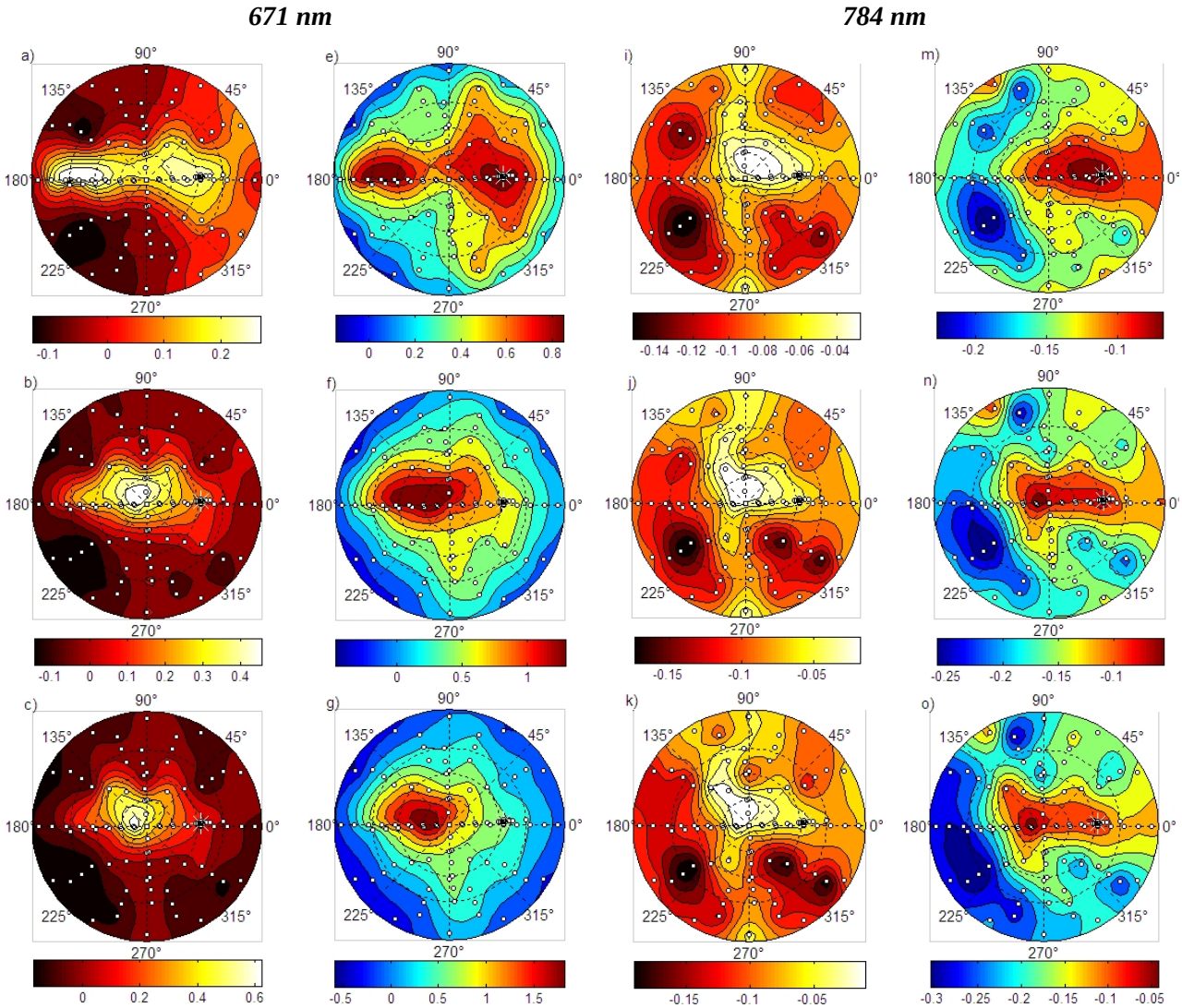
b) Ensemble des directions : $\theta_v \in [0; 90°[$ et $\varphi_v \in [0; 360°]$

L'impact du bois sur la distribution directionnelle des FRD est évalué en calculant les différences relatives entre les FRD des scénarios FW et F (ε_{FW}) et entre les FRD des scénarios FWT et F (ε_{FWT}) :

$$\varepsilon_{FW} = \frac{\rho_{FW} - \rho_F}{\rho_F} \qquad \varepsilon_{FWT} = \frac{\rho_{FWT} - \rho_F}{\rho_F} \tag{III-8}$$

Les *Figure III-18* et *Figure III-19* montrent l'évolution de ε_{FW} et ε_{FWT} en fonction du LAI pour deux longueurs d'onde (λ = 671nm et 784nm) et les deux couverts extrêmes. Les différences sont représentées en coordonnées polaires (x = θ_v.cosφ_v, y = θ_v.sinφ_v) où θ_v et φ_v sont respectivement les angles zénithal et azimutal de visée. D'une manière générale, s'agissant du couvert épars (CC = 55%; *Figure III-18*), les écarts entre scénarios augmentent en fonction du LAI, pour les deux longueurs d'onde. Par contre, pour le couvert dense (CC =95%; *Figure III-19*), ils tendent à rester stable ou diminuer. D'un point de vue spectral, comparé au scénario F, l'introduction du bois dans le houppier tend à : augmenter les FRD rouge et, diminuer les FRD PIR quels que soient les LAI et les CC. Les écarts les plus importants (ε_{FW} = 0.9 et ε_{FWT} = 1.9) sont observés dans le rouge pour CC = 55% et LAI = 12. Plus précisément, ces comparaisons dénotent des tendances qui évoluent en fonction du domaine spectral et de la

densité des arbres. Pour λ = 671nm, le couvert épars présente des zones de surestimation maximale distribuées sur tout le plan principal. L'augmentation du LAI tend à réduire ces surfaces et à les centrer autour d'une direction particulière suivant le scénario simulé : θ_v = 10° (FW; *Figure III-18*-abcd) et θ_v = 20° (FWT; *Figure III-18*-efjh). Dans le PIR, l'influence du bois (*i.e.* branches du 1er ordre pour FW et "branches + brindilles" pour FWT) est prépondérante pour certaines zones, centrées sur des plans azimutaux qui correspondent aux axes des branches : φ_v = 45°, 135°, 225° et 315°. Pour FW, elle reste toutefois moins marquée au nadir, autour du *hot spot* ainsi que dans le plan orthogonal. Le scénario FWT diminue particulièrement les diffusions vers l'avant et influence plus sensiblement les directions proche du nadir et le régime de rétrodiffusion.



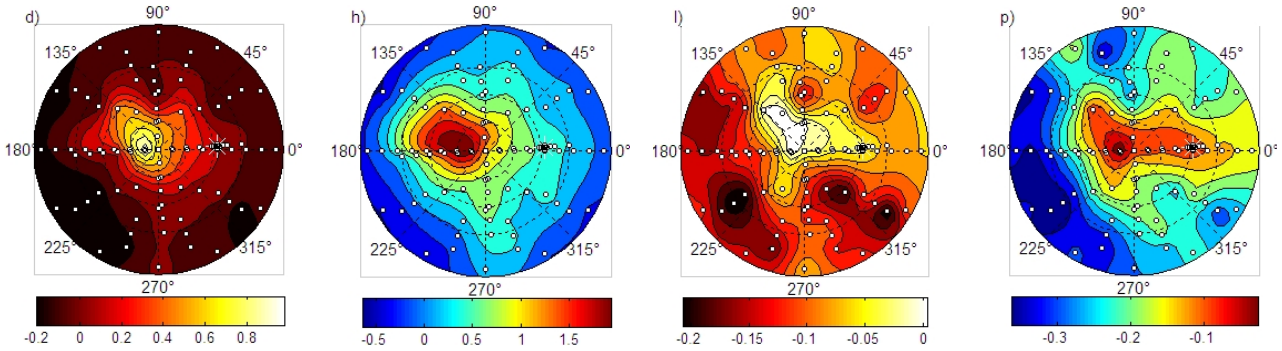
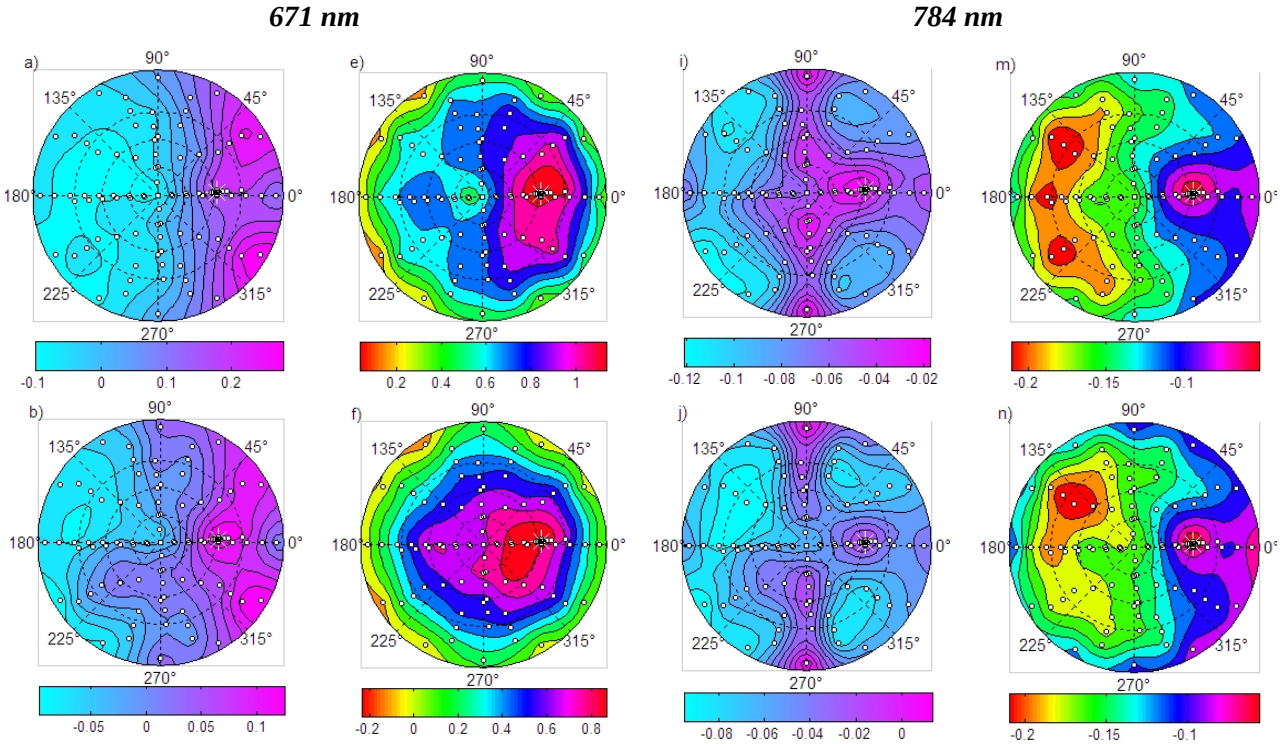


Figure III-18: Différences relatives ε_{FW} (a, c, e, g, i, k, m, o) et ε_{FWT} (b, d, f, h, j, l, n, p). Rouge (gauche : λ = 671nm) et PIR (droite : λ = 784nm). 4 LAI : 3 (a, b, c, d), 6 (e, f, g, h), 9 (i, j, k, l) et 12 (m, n, o, p). CC=55%. La position solaire est notée par une étoile blanche.

Dans le rouge, le couvert dense présente des écarts maximaux centrés autour du *hot spot*. L'augmentation du LAI tend à les étendre à tout l'espace, excepté pour le scénario FW. En effet, ce dernier rehausse principalement le régime de rétrodiffusion (*Figure III-19*-abcd) avec un impact d'autant plus marqué que le LAI est faible. Pour λ = 784nm, l'introduction du bois diminue nettement les diffusions vers l'avant, mais ne modifie guère le rayonnement diffusé autour du *hot spot* à la fois pour FW (*Figure III-19*-ijkl) et FWT (*Figure III-19*-mnop).



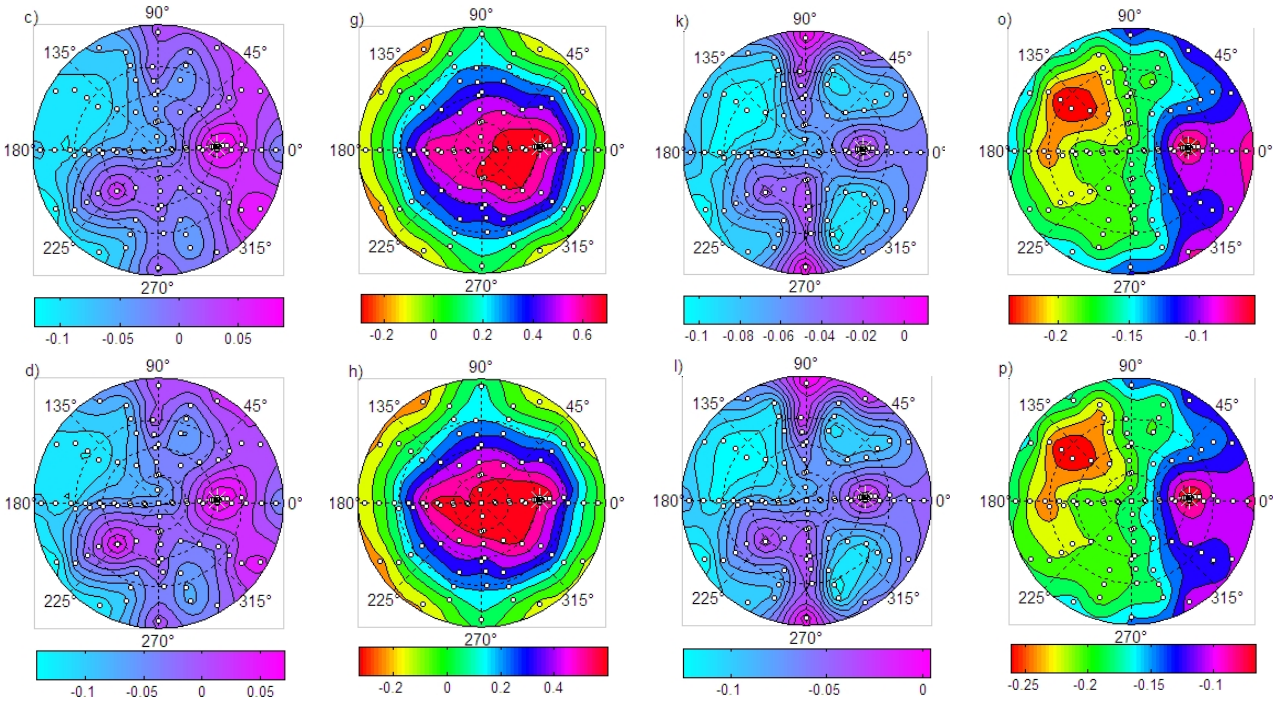


Figure III-19: Différences relatives ε_{FW} (a, c, e, g, i, k, m, o) et ε_{FWT} (b, d, f, h, j, l, n, p). Rouge (gauche : λ = 671nm) et PIR (droite : λ = 784nm). 4 LAI : 3 (a, b, c, d), 6 (e, f, g, h), 9 (i, j, k, l) et 12 (m, n, o, p). CC=95%. La position solaire est notée par une étoile blanche.

Ces résultats montrent que la surface de bois, quoique largement inférieure à la surface foliaire, influence de manière significative la propagation des photons au sein d'un couvert forestier. Les 3 scénarios simulés par DART révèlent un impact plus important de l'ensemble "rameaux + brindilles + aiguilles", modélisé par les cellules mixtes, par rapport aux éléments de bois (*i.e.* troncs et branches du 1er ordre) simulés par la juxtaposition de surfaces opaques.

- Les écarts sont notamment plus importants dans le rouge. Ceci est principalement dû aux fortes propriétés optiques ($\omega_t \approx \rho_t \approx 27.7\%$ et $\tau_t = 0$) des brindilles comparées à celles du bois ($\rho_b \approx 21\%$), du sol ($\rho_s \approx 11\%$) et de la végétation ($\omega_v \approx 4.4\%$). De plus, leur distribution autour des branches du 1er ordre peut atteindre la périphérie des houppiers amplifiant ainsi leur effet.
- L'impact dissymétrique, observé surtout dans le PIR provient de la forte anisotropie de la fonction de phase associée aux cellules mixtes, vu les propriétés optiques des brindilles ($\tau_t = 0$).
- Plusieurs effets particuliers (chute de la réflectance dans le PIR) sont visibles sur certains plans azimutaux où la présence des branches les plus hautes (FW) et la distribution des brindilles autour de ces dernières (FWT) jouent un rôle particulier.

III.4.2 Relation indices de végétation - LAI

Cette partie est consacrée à l'étude de l'impact du bois sur quatre indices de végétation dont trois sont des combinaisons linéaires de données spectrales au nadir (NDVI, AVI, GEMI) et un est issu de données spectrales directionnelles (HDS).

- ***NDVI, AVI et GEMI***

Trois indices de végétation, NDVI, AVI et GEMI sont générés à partir des FRD DART en différenciant les FRD nadirs issus des pixels "houppiers", "éclairés" et "à l'ombre". Leur sensibilité à une variation du LAI entre 3 et 15 $m^2.m^{-2}$ est testée pour dix taux de couverture (CC = 55% - 95%). Ces valeurs reflètent les grandeurs mesurées sur la parcelle d'étude. La *Figure III-20* illustre les variations du NDVI en fonction de l'indice foliaire. D'une manière générale, le NDVI augmente avec le LAI et sature pour un LAI compris entre 5 et 10 $m^2.m^{-2}$. Les scénarios F (*Figure III-20*-abc) et FW (*Figure III-20*-def) exhibent sensiblement les même tendances avec toutefois, pour FW, des NDVI plus faibles et une variabilité plus grande suivant CC. Le scénario "FWT" montre une forte diminution des NDVI et une sensibilité accrue au CC (*Figure III-20*-ghi). La diminution du NDVI avec l'introduction du bois est cohérente. En effet, la simulation du bois implique un plus faible contraste spectral "PIR *vs*. Rouge", accentué par le phénomène des diffusions multiples. Le NDVI est donc plus sensible au LAI pour le scénario FWT, avec des niveaux de saturation qui peuvent atteindre 10 $m^2.m^{-2}$, principalement pour CC = 95%, quand les effets du sol deviennent négligeables.

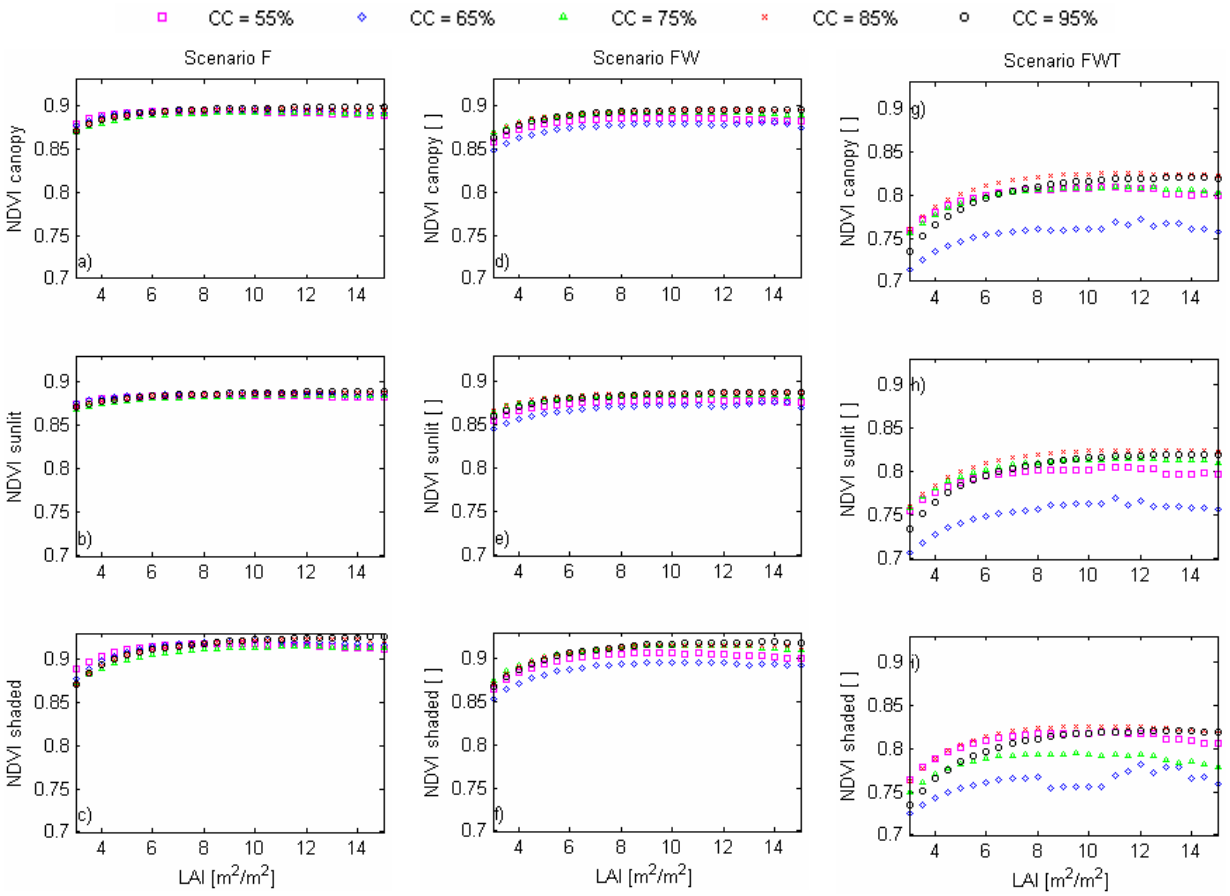


Figure III-20: Courbes "NDVI-LAI" simulées à partir des FRD des pixels "houppier"(a,d,g), "éclairés" (b,e,h) et "à l'ombre" (c,f,i). 3 scénarios : F (a,b,c); FW (d,e,f); FWT (g,h,i). 5 CC : 55, 65, 75, 95%.

L'évolution de l'indice AVI en fonction de l'indice foliaire est plus complexe que celle du NDVI. En effet, des tendances diffèrent suivant les 2 catégories de pixels du houppier.

- Pour les pixels "éclairés" (*Figure III-21*-beh), l'augmentation du LAI génère des courbes de AVI concaves pour des LAI plutôt faibles (entre 3 et 5 $m^2.m^{-2}$) suivies par une décroissance quasi linéaire.
- Les AVI calculés à partir des pixels "à l'ombre" (*Figure III-21*-cfi) diminuent de manière monotone en fonction du LAI avec une sensibilité plus marquée que dans le cas précédent.

Les AVI issus des FRD "houppier" résultent de la combinaison des deux zones avec des indices foliaires associés aux deux points d'inflexions qui varient en fonction du scénario. Les courbes des scénarios F et FW varient de manière identique. Par contre, le scénario FWT présente des valeurs de AVI plus faibles quelle que soit la zone du houppier, et une plus forte variation au CC notamment pour les pixels "éclairés".

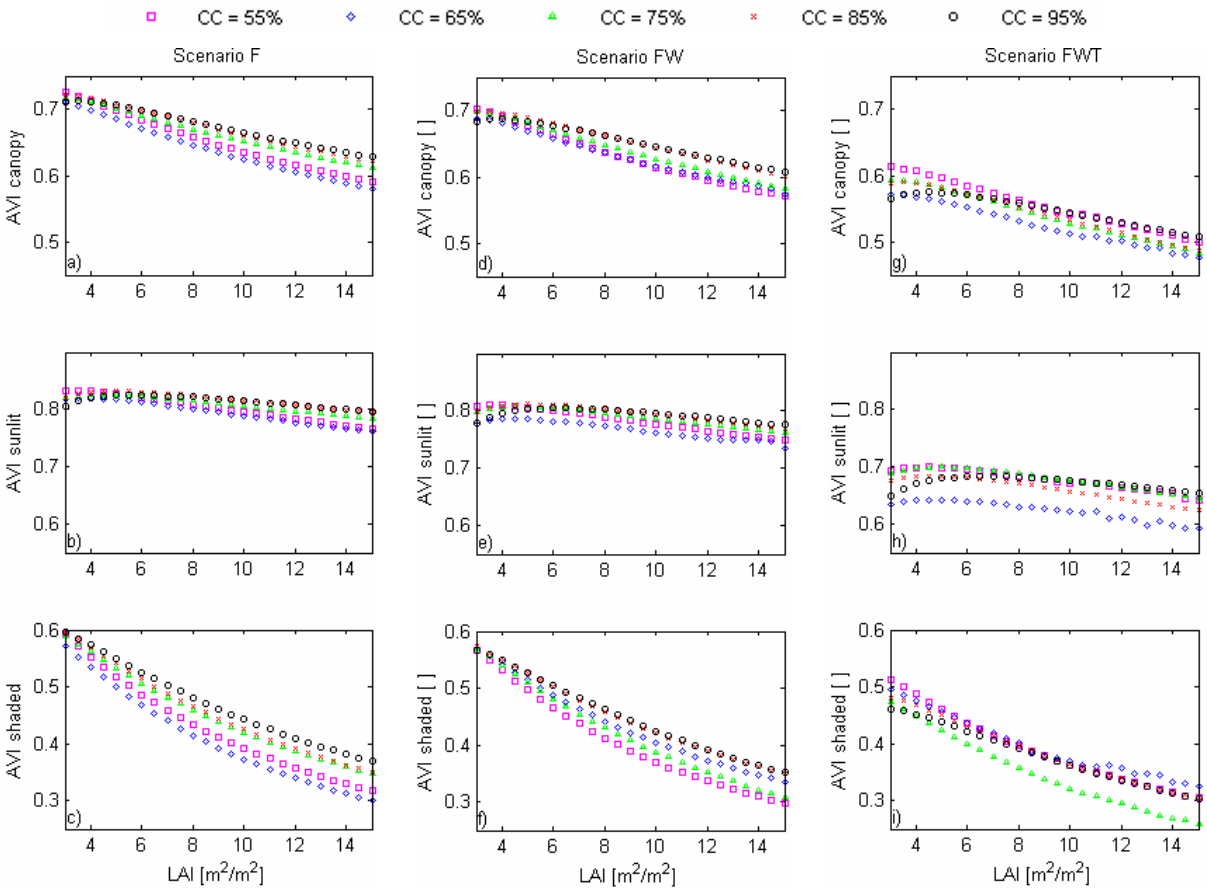


Figure III-21: Courbes "AVI-LAI" simulées à partir des FRD des pixels "houppier" (a,d,g), "éclairés" (b,e,h) et "à l'ombre" (c,f,i). 3 scénarios : F (a,b,c); FW (d,e,f); FWT (g,h,i). 5 CC : 55, 65, 75, 95%.

L'indice GEMI varie de manière similaire au AVI :

- les GEMI calculés à partir, à la fois des pixels "houppier" et des pixels "éclairés" exhibent une forme concave pour des LAI plutôt faibles, suivie par une décroissance quasi-linéaire. La position du point d'inflexion varie en fonction du scénario et du CC.
- Les pixels "à l'ombre" génèrent des GEMI inversement proportionnels au LAI.
- Alors que les scénarios F (*Figure III-22*-abc) et FW (*Figure III-22*-def) présentent des GEMI quasi-identiques, ceux calculés à partir des FRD du scénario FWT (*Figure III-22*-ghi) sont systématiquement inférieurs.

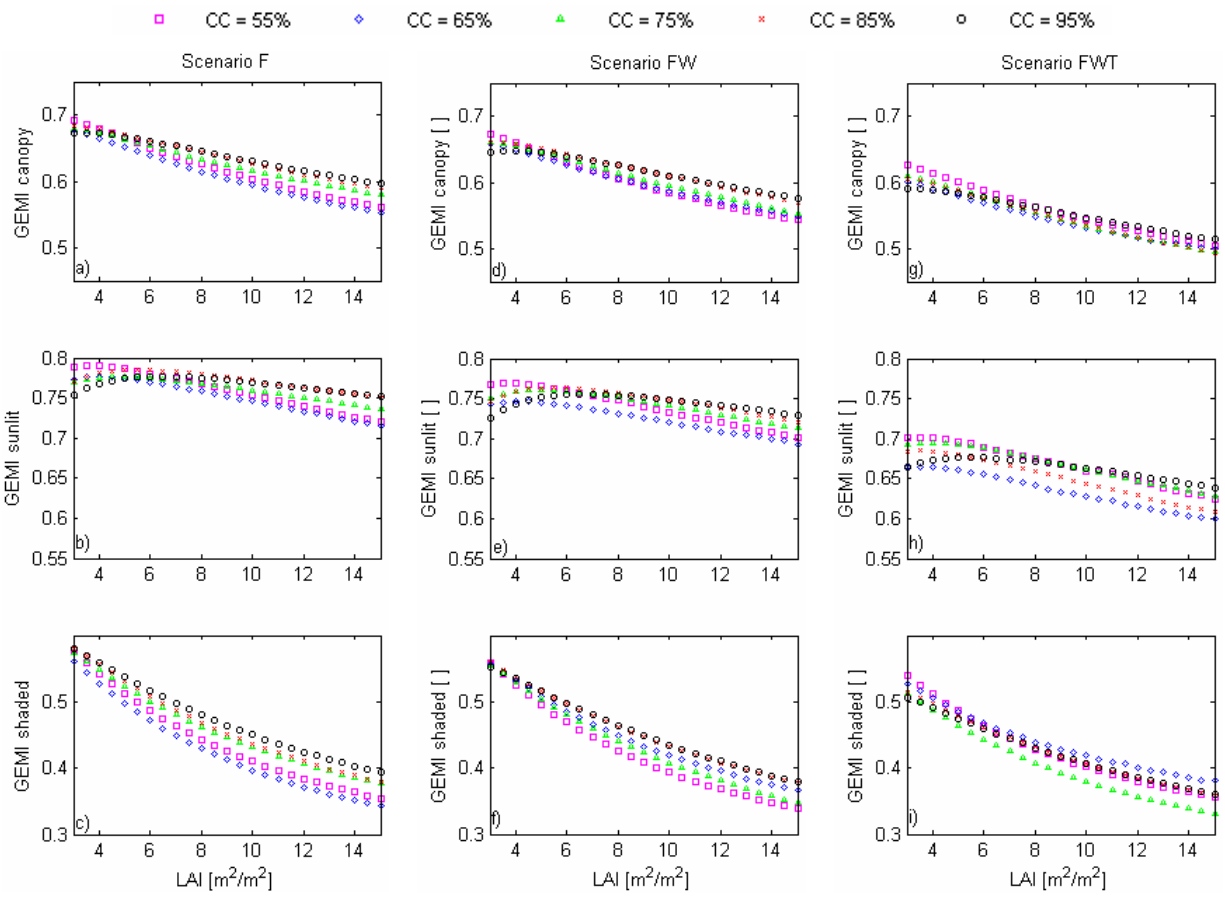


Figure III-22: Courbes "GEMI-LAI" simulées à partir des FRD des pixels "houppier"(a,d,g), "éclairés" (b,e,h) et "à l'ombre" (c,f,i). 3 scénarios : F (a,b,c); FW (d,e,f); FWT (g,h,i). 5 CC : 55, 65, 75, 95%.

- ***Indice "Hot-Dark Spot"***

L'indice HDS est testé selon les trois scénarios avec un LAI variant entre 3 et 15$m^2.m^{-2}$ pour trois couverts : épars (CC = 55%), intermédiaire (CC = 75%) et dense (CC = 95%). Afin de quantifier sa variabilité spectrale, il est considéré les bandes spectrales du vert (*Figure III-23*-a; λ = 559nm), du rouge (*Figure III-23*-b; λ = 671nm), du rouge décalé (*Figure III-23*-c; λ = 727nm) et du PIR (*Figure*

III-23-d; λ = 783nm). L'indice HDS est généré à partir des FRD maximum et minimum simulés dans le plan principal. Ces extrema sont respectivement associés à la direction du *hot spot* et celle du *dark spot*. Cette dernière est indiquée par une étoile sur la *Figure III-16* et la *Figure III-17*. Quel que soit le scénario, la variation de HDS en fonction du LAI dénote trois caractéristiques essentielles :

- Une croissance quasi-linéaire (*Tableau III-6*) pour tout λ et CC.
- Une sensibilité inversement proportionnelle à CC.
- Une plage de variation qui évolue en fonction du domaine spectral. Les valeurs minimales et maximales atteignent : 2.54 - 19.17 (λ = 559nm), 4.26 - 26.12 (λ = 671nm), 1.61 - 11.29 (λ = 727nm) et 1.33 - 8.48 (λ = 783nm).

Ainsi, l'augmentation du LAI diminue la transmittance des houppiers et tend à réduire principalement ρ_{DS} par rapport à ρ_{HS} (*Figure III-16* et *Figure III-17*).

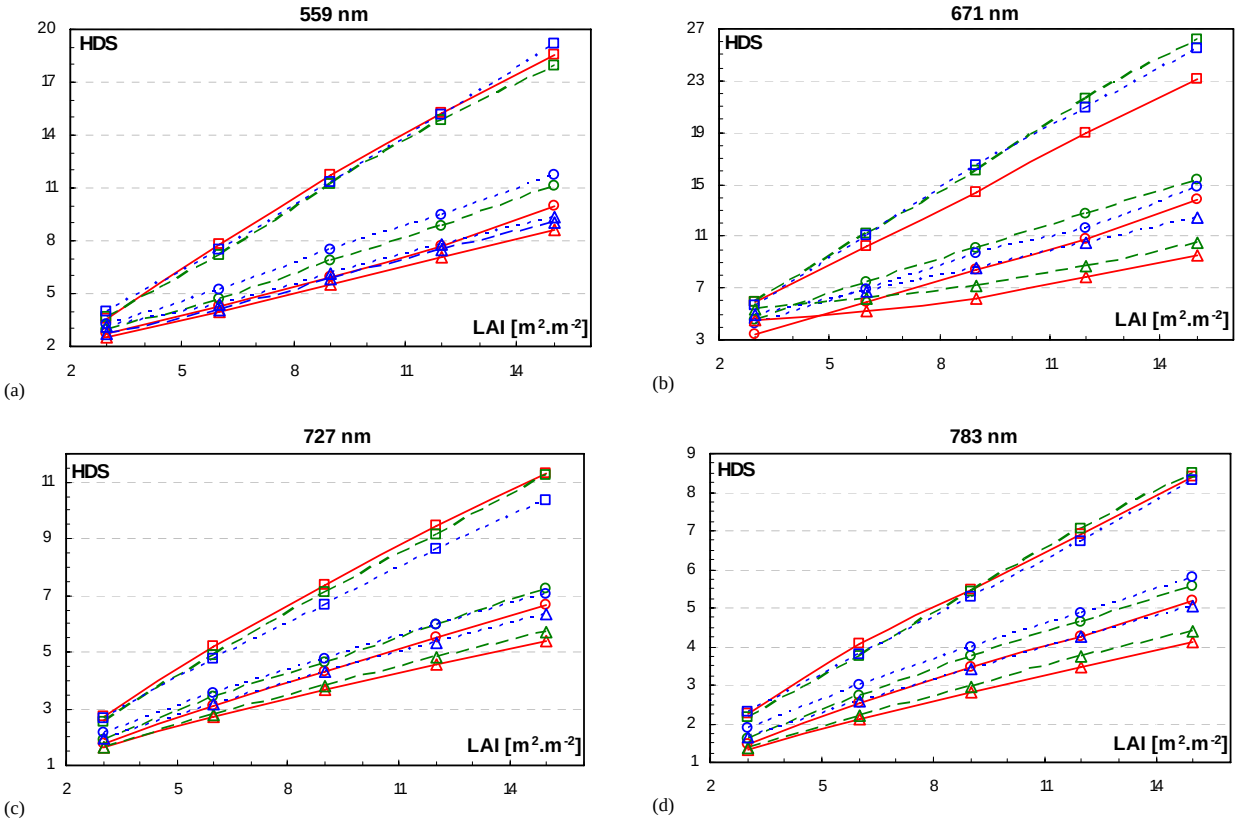


Figure III-23: Comparaison des variations de HDS en fonction du LAI simulées pour les 3 scénarios {F: rouge (-), FW : vert (--) et FWT : bleu (...)} et 3 CC : 55% (□), 75% (○) et 95% (△). 4 longueurs d'onde : a) vert (559nm); b) rouge (671nm); c) rouge intermédiaire (727nm); d) PIR (784nm).

Donc, plus le milieu présente un CC faible, plus l'indice HDS est sensible aux variations de LAI. En effet, une variation de ce dernier, accentue les effets directionnels et donc, le contraste entre les réflectances des zones éclairées et des zones à l'ombre. Aussi, plus le domaine spectral privilégie les

mécanismes d'ordre 1 par rapport aux diffusions multiples, plus les amplitudes de variation de l'indice HDS en fonction du LAI sont importantes. Cette tendance est due aux diffusions multiples qui tendent à augmenter le niveau radiométrique des zones à l'ombre et donc à réduire le contraste entre ces dernières et les aires éclairées. Ainsi, HDS est très lié au niveau d'agrégation d'un couvert forestier, notamment à l'échelle de la parcelle (CC). Il est aussi un indicateur particulièrement sensible à la variation du LAI notamment, pour les couverts épars. Qu'en est il au niveau des agrégats de matière au sein des houppiers ? Autrement dit, HDS rend-il compte de la prise en compte du bois dans la canopée ? Les comparaisons des indices HDS calculés pour les trois scénarios permettent de répondre plutôt positivement pour les quatre domaines spectraux simulés. En effet, le scénario F présente des HDS systématiquement inférieurs aux deux autres scénarios excepté pour CC = 55% avec λ = 559nm et λ = 727nm. Dans le visible, les différences augmentent avec le LAI et la diminution de CC. Pour λ = 671nm, le couvert épars génère suivant les scénarios F/FW/FWT des HDS qui augmentent respectivement de 5.96/5.91/5.7 pour un LAI égal à 3, jusqu'à 23.11/26.12/25.51 pour un LAI égal à 15. Concernant le couvert dense, l'indice HDS croit de 5.24/6.14/6.69 (LAI = 3) à 9.53/10.46/12.45 (LAI = 15). Dans le PIR au contraire, ces écarts restent plutôt stables avec des variations non significatives en fonction des LAI et des CC. Pour λ = 783nm, l'accroissement du LAI entre 3 et 15, augmente l'indice HDS de 2.24/2.16/2.28 à 8.4/8.48/8.32 (CC = 55%) et de 1.33/1.35/1.67 à 4.09/4.42/5.04 (CC = 95%). En général, HDS rend compte des agrégats de matières (feuilles et bois) au sein des houppiers pour des LAI forts et des CC élevés. En effet, l'introduction du bois dans les couronnes très denses amplifie les effets directionnels, entraînant des contrastes plus forts entre les zones éclairées et celles à l'ombre. *In fine*, l'indice HDS est donc plus sensible aux éléments macroscopiques formant le paysage (groupement d'arbres) pour des CC faibles et aux diffuseurs centimétriques (feuilles et rameaux) pour des CC et LAI élevés.

Scénario - CC	*559 nm*		*671 nm*		*727 nm*		*783 nm*	
[%]	HDS	r^2	HDS	r^2	HDS	r^2	HDS	r^2
F - 55	1.2473.LAI+0.1396	.997	1.4354.LAI+1.5933	.998	0.7154.LAI+0.7558	.997	0.5064.LAI+0.858	.998
FW - 55	1.2035.LAI+0.1267	.998	1.693.LAI+0.9553	.999	0.725.LAI+0.4642	.999	0.5304.LAI+0.5983	.999
FWT - 55	1.2671.LAI+0.0168	.999	1.6469.LAI+1.0904	.998	0.6425.LAI+0.8409	.999	0.5011.LAI+0.7707	.999
F - 75	0.6036.LAI+0.6724	.999	0.8519.LAI+0.816	.998	0.4055.LAI+0.6267	.999	0.3047.LAI+0.6398	.998
FW - 75	0.6863.LAI+0.6974	.999	0.8985.LAI+1.9141	.999	0.4393.LAI+0.6677	.999	0.3267.LAI+0.7109	.998
FWT - 75	0.7089.LAI+1.0119	.999	0.8565.LAI+1.711	.995	0.4033.LAI+1.0589	.998	0.3249.LAI+0.9862	.997
F - 95	0.5059.LAI+0.9758	.999	0.4226.LAI+2.8668	.969	0.3125.LAI+0.7654	.997	0.2301.LAI +0.693	.998
FW - 95	0.5345.LAI+1.0089	.999	0.4294.LAI+3.7013	.978	0.338.LAI+0.7054	.998	0.2558.LAI+0.631	.999
FWT - 95	0.5307.LAI+1.3864	.997	0.6288.LAI+2.9369	.999	0.3632.LAI+0.9479	.999	0.2815.LAI+0.8626	.999

Tableau III-6: Relations entre l'indice HDS et le LAI obtenues par régressions linéaires pour les 3 scénarios et 3 CC : 55%, 75% et 95%.

III.4.3 Conséquences sur l'inversion du LAI

- Pour un domaine spectral compris entre 400 et 1000nm, les longueurs d'onde les plus appropriées, pour retrouver le LAI des couverts forestiers, se situent sur le plateau PIR entre 730 et 900nm. En effet, les intervalles 400-730nm et 900-1000nm sont influencés respectivement par les phénomènes d'absorption spécifique des pigments foliaires (chlorophylle, caroténoïde, *etc.*) et les bandes d'absorption des molécules d'eau. Plus ces composés sont présents dans les tissus foliaires plus ils influencent les propriétés optiques éléments constitutifs du milieu. De plus, d'un point de vue théorique, un contraste radiométrique sol/végétation faible implique une inversion du LAI moins fiable (Gobron et al., 1997b). Ces domaines spectraux sont donc moins sensibles et par conséquent moins adaptés pour l'inversion des propriétés structurales (LAI) du couvert forestier. Dans le PIR, la simulation des images DART a montré une influence notable du bois dans le houppier, notamment pour les pixels "éclairés". Dans le cadre d'études dédiées à l'inversion du LAI, l'augmentation de la précision des FRD, ainsi que la suppression de la concavité des courbes "FRD-LAI" représentent 2 arguments de poids pour la prise en compte de la simulation du bois dans les modèles T-R.

- De plus, la *Figure III-14* montre que l'introduction du bois dans les houppiers augmente, pour un même LAI, la sensibilité des FRD nadir au CC. Ces effets peuvent perturber la précision des LAI déterminés par inversion. Donc, l'algorithme conçu pour les images THR doit tenir compte de ce paramètre structural qui influence la qualité de la procédure.

- Les 3 indices de végétation testés (NDVI, AVI et GEMI) sont sensibles à la présence de bois dans les houppiers. La simulation, notamment celle des cellules mixtes influence de manière inverse les FRD PIR (diminution) et rouge (augmentation) des houppiers.
  a) Ces variations tendent à réduire l'amplitude des valeurs de NDVI et à augmenter sa variabilité au CC. Même si ces modifications augmentent le LAI de saturation du NDVI (6 pour F et 10 pour FWT), ces contraintes limitent l'utilisation du NDVI pour une inversion généralisée du LAI à THR.
  b) Les décroissances des FRD vert, rouge et PIR avec le LAI entraînent un élargissement des angles complémentaires a_1 et a_2 [Eq. (III-4)] et donc une diminution des valeurs de AVI. Les courbes "AVI-LAI" exhibent une décroissance quasi-linéaire pour des LAI > $5 m^2.m^{-2}$, limitant aussi son utilisation opérationnelle pour l'inversion du LAI.
  c) La diminution des FRD fait chuter les valeurs de GEMI avec une décroissance "GEMI-LAI" quasi-linéaire quel que soit le LAI avec une meilleure stabilité aux CC que les 2 autres indices. Il est donc potentiellement utilisable.

- L'indice HDS évolue de manière linéaire en fonction du LAI, avec une sensibilité inversement proportionnelle à CC, et, une plage de variation qui augmente avec les effets directionnels

induits par λ : $\Delta HDS_R > \Delta HDS_V > \Delta HDS_{RE} > \Delta HDS_{PIR}$. Son utilisation pour l'inversion du LAI à partir de données monodirectionnelles THR doit prendre en compte sa variabilité au CC et λ. Elle pourrait s'articuler en 3 étapes :

a) Extraction précise des CC par une méthode de classification appliquée aux images THR.
b) Calcul des tables HDS(λ,CC,LAI) pour chaque λ, à partir des CC extraits à l'étape précédente et des valeurs de LAI mesurées sur la parcelle.
c) Détermination des LAI en utilisant les tables de correspondance des HDS pré calculées.

III.5 CONCLUSION PARTIELLE

Dans cette étude, le modèle DART sert à évaluer l'influence du bois (*i.e.* troncs, branches principales, rameaux et brindilles) sur la réflectance THR d'une parcelle de sapins de Norvège. La paramétrisation précise du modèle est basée sur des mesures *in situ* réalisées sur le site de Bily Kriz en République Tchèque. L'incorporation des caractéristiques structurales intrinsèques du peuplement forestier étudié permet de reproduire plus précisément les FRD du capteur hyperspectral AISA.

L'introduction du bois dans les houppiers affecte beaucoup les FRD avec notamment une forte réduction des FRD nadirs PIR et une augmentation des effets directionnels. Son influence sur les FRD des houppiers est plus marquée pour les zones éclairées que pour les parties à l'ombre. Il faut noter que ce travail s'est focalisé sur la réponse radiométrique d'une parcelle de sapins de Norvège jeunes (stade productif : 27 ans) présentant une structure plutôt homogène. Des travaux sont en cours sur une parcelle plus ancienne très agrégée (stade 3 et 4 de développement du houppier). Les premiers résultats laissent entrevoir un impact encore plus important des éléments de bois sur les FRD.

Cette étude permet d'évaluer les intéractions "onde-matière" au sein d'un milieu forestier complexe simulé à très haute résolution spatiale. Elle est une première étape pour améliorer ou concevoir les méthodes d'inversion THR dédiées aux paramètres structuraux des forêts. La distribution spatiale des rameaux et des brindilles couplée à une modélisation plus fine du T-R doit améliorer ces procédés. En outre, nous savons que l'augmentation du nombre de paramètres d'entrée diminue la capacité d'inversion d'un modèle (Combal et al., 2003). Néanmoins, la connaissance *a priori* de certains paramètres "fixes" diminue ce problème.

Les études de sensibilité réalisées sur 4 indices de végétation/directionnel (NDVI, AVI, GEMI, HDS) soulignent l'intérêt des méthodes "physiques" basées sur l'inversion de modèle T-R plutôt que celles empiriques reposant sur des relations statistiques entre ces indices et le LAI. En effet, les résultats des simulations montrent que ces indices présentent de fortes variabilités spectrales et structurales.

Une attention particulière doit être apportée dans le futur aux méthodes physiques basées sur l'inversion de modèle T-R 3-D. Ces approches reposent déjà sur une paramétrisation spécifique du biome ou de l'écosystème étudié. Vu la sensibilité des FRD à l'architecture des houppiers, ces

méthodes doivent tenir compte de l'évolution des propriétés optiques et structurales de la végétation en rapport avec ses différents stades de fonctionnement et les différentes espèces qu'elle contient. L'introduction des éléments de bois et des caractéristiques architecturales intrinsèques au peuplement forestier étudié, associée à une modélisation précise du T-R dans DART, est une première étape. Elle pourrait être suivie par la modélisation d'éléments bio-indicateurs tel que les lichens et les algues vertes, particulièrement intéressants pour les études environnementales. L'utilisation de données THR multidirectionnelles permettrait aussi une validation plus fine de l'approche implantée.

Cette étude montre l'intérêt d'associer les compétences des écologues "spécialiste du terrain" et des modélisateurs pour rendre plus réaliste les modèles T-R et par conséquent améliorer l'interprétation des données de télédétection.

IV INVERSION DE DART POUR L'EXTRACTION DE PARAMETRES BIOPHYSIQUES

IV INVERSION DE DART POUR L'EXTRACTION DE PARAMÈTRES BIOPHYSIQUES 147
IV.1 Introduction 148
IV.2 Généralités sur le processus d'inversion 150
IV.3 Méthode d'inversion multispectrale 152
IV.3.1 Maquettes pour la génération des LUT 153
IV.3.2 Saisie des paramètres 155
IV.3.3 Représentation des FRD par un modèle analytique 157
IV.3.4 Inversion des paramètres libres (P) 157
IV.3.5 Organigramme de la procédure d'inversion 158
IV.4 Matériels et méthode 160
IV.4.1 Données disponibles 160
IV.4.2 Objectifs de l'étude 161
IV.4.3 Méthodologie 162
IV.5 Résultats et discussion 165
IV.5.1 Impact du schéma d'inversion : Données non bruitées 165
IV.5.2 Impact du schéma d'inversion : Données bruitées 166
IV.5.3 Inversion des données AISA 168
IV.6 Conclusion partielle 172

IV.1 INTRODUCTION

L'inconvénient majeur des modèles complexes tel que DART est de nécessiter de trop longs temps de calcul. En effet, la rapidité du processus d'inversion par les méthodes classiques (*e.g.* méthodes des moindres carrés ou du simplexe), dépend du temps de simulation. Ce dernier devient donc une contrainte majeure pour le traitement opérationnel de gros volumes de données, tels que les images de télédétection. Deux solutions utilisées avec DART pour résoudre ce problème sont indiquées ici : (1) les réseaux de neurones et (2) les tables de correspondance. Elles ont pour principal avantage de fortement réduire les temps de calcul du processus d'inversion réalisé "pixel à pixel", car les simulations du modèle ne sont plus dans la "boucle" de l'algorithme d'inversion.

Les réseaux de neurones (Kimes et al., 2000) sont constitués de nœuds interconnectés, répartis en couches. Les nœuds de la première couche représentent les entrées, *i.e.* les mesures de réflectance et les conditions d'acquisition, alors que les nœuds de la dernière couche correspondent aux sorties, *i.e.* les paramètres biophysiques recherchés. Les nœuds sont en fait des fonctions mathématiques paramétrées qui donnent la valeur de sortie à partir des valeurs d'entrée. La phase d'apprentissage, permet de calculer les paramètres des différents nœuds, avec un jeu d'entrées/sorties. Ce jeu est créé par simulation directe de valeurs de réflectance à l'aide du modèle que l'on désire inverser, en faisant varier certains de ces paramètres d'entrée. Une fois la phase d'apprentissage terminée, le réseau de neurones ainsi constitué peut déterminer de manière extrêmement rapide, à partir de mesures de réflectance, les paramètres biophysiques recherchés.

Une alternative à l'emploi de réseaux de neurones est de pré-calculer des jeux de simulations pour une gamme de paramètres adaptés au paysage et de les stocker dans une table, appelée LUT (*i.e.* Look Up Table dans la terminologie anglaise). La méthode d'inversion recherche dans la table les valeurs les plus proches de la valeur considérée, afin d'obtenir les paramètres d'entrée associés. L'espace des paramètres étant décrit de manière discrète dans la table, une procédure d'interpolation peut éventuellement être utilisée pour décrire cet espace de manière continue.

Les premiers travaux d'inversion du modèle 3-D DART reposent sur une approche tabulée (Estève, 1998). Des études récentes sur l'inversion de DART, ont mis en évidence les avantages et les inconvénients de ces deux méthodes (Kimes et al., 2002). L'approche des tables pré calculées a aussi été adaptée aux images THR, avec des résultats très encourageants (Gascon 2001b; Gascon et al., 2004) pour l'inversion du LAI d'une forêt tempérée. Des travaux sont en cours pour utiliser les réseaux de neurones sur les images THR (Homolova, 2005; Malenovsky, Martin et al., 2005).

Ce chapitre présente l'approche tabulée (LUT). Suite aux améliorations (approche multispectrale, cellules mixtes, *etc*) apportées au modèle DART dans le cadre cette thèse, j'ai dû fortement améliorer

et généraliser la procédure d'inversion initiale (Gastellu-Etchegorry et al., 2003). Ainsi, j'ai développé une nouvelle méthode de génération de LUTs pour :

- Permettre la lecture des nouveaux formats des fichiers d'entrée/sortie du modèle DART;
- Introduire deux nouveaux paramètres foliaires (*i.e.* épaisseur équivalente en eau C_w et teneur en matière sèche C_m), particulièrement intéressants dans les études de croissance des plantes et dans les modèles de fonctionnement des écosystèmes;
- Améliorer la représentativité de la maquette "4 arbres", utilisée pour simuler la réflectance des couverts arborés 3-D. Il a en particulier fallu ajouter les nouvelles caractéristiques structurales (troncs, branches, brindilles, cellules mixtes);
- Créer un nouveau type de maquette adaptée aux zones agricoles;
- Reformuler la fonction du *hot spot* du modèle à six ou huit coefficients.

Le principe de la méthode d'inversion a été conservé, avec une adaptation pour les images hyperspectrales afin de prendre en compte l'approche multispectrale de DART ainsi que les deux nouveaux paramètres libres C_w et C_m.

La méthode d'inversion a été appliquée aux images hyperspectrales THR AISA d'un couvert forestier (c*f.* chapitre III). Ce travail a permis d'étudier comment le processus d'extraction de l'indice foliaire est influencé par :

- Les paramètres expérimentaux : nombre de canaux, résolution spatiale, *etc*.
- Le mode de représentation des arbres et la modélisation du transfert radiatif (T-R) associée.

A priori, l'amélioration des caractéristiques des capteurs de télédétection (*e.g.* résolution spatiale, mesures multi-angles, résolution spectrale, *etc.*) ne peut qu'affiner les résultats des méthodes d'inversion. En fait, les méthodes "classiques" d'inversion se révèlent souvent inadaptées à ces nouvelles techniques de mesures. Ici, le cas qui nous intéresse est celui des mesures de télédétection THR. Ainsi, l'inversion "pixel par pixel" des images THR de couverts forestiers ne permet pas d'extraire directement le LAI, car l'information radiométrique d'un pixel est trop petite pour donner un LAI significatif. Deux types de solutions originales sont indiqués ci-dessous :

- Inversion pixel à pixel en employant des mesures directionnelles combinées à une fonction coût paramétrique (Meroni et al., 2004), définie à partir d'informations *a priori*.
- Inversion sur des valeurs moyennes de zones homogènes. Ces zones correspondent par exemple aux quatre composantes "houppiers éclairés/à l'ombre" et "sous-bois éclairé/à l'ombre", ou à des régions statistiquement représentatives pour ce qui est du LAI. Dans le

premier cas, les quatre composantes des réflectances mesurées ρ_{mes} sont extraites d'images monodirectionnelles (Gascon et al., 2004) ou multidirectionnelles (Casa & Jones, 2005) par "segmentation - classification" alors que les quatre composantes des réflectances simulées sont en général directement calculées par un modèle de suivi de rayons. Dans le deuxième cas, la taille des fenêtres de moyennage varie suivant le schéma de mesure. Ainsi, avec des données aéroportées à 5 m de résolution, Kötz et al., (2004) utilisent une fenêtre de 30 m^2 pour des LAI mesurés selon le schéma VALERI: 9 points répartis sur des placettes de 20 m^2. Avec ces mêmes données, Schlerf & Atzberger (2006) moyennent ρ_{mes} sur des disques de rayon 42 m centrés sur des zones de 30 m^2 (10 points de mesure).

De plus, l'inversion de données hyperspectrales s'appuie parfois sur la détermination d'un nombre limité de bandes spectrales pour identifier toute corrélation entre bande et/ou augmenter le niveau de corrélation avec les paramètres libres. Néanmoins, aucun critère de sélection n'a encore été formellement défini par la communauté scientifique. La sélection des bandes est le plus souvent réalisée à partir d'une approche empirique (Weiss et al., 2000; Meroni et al., 2004) qui consiste, à partir d'un nombre minimal de bandes (2 ou 3 bandes R/PIR ou R/PIR/MIR), à tester bande par bande chaque combinaison possible. La combinaison spectrale retenue est celle qui minimise le RMSE entre les paramètres estimés et mesurés. Cette approche, qui est appliquée sur un nombre restreint de points de mesure, ne garantie pas de trouver le minimum optimal. La problématique qui est posée ici n'est pas de sélectionner une configuration spectrale quasi-optimale, mais plutôt d'identifier l'apport d'un nombre limité de bandes par rapport à une configuration minimale à deux bandes.

Après une brève introduction sur le processus d'inversion et la présentation de la méthode d'inversion mutispectrale de DART, mon travail a donc consisté à valider cette méthode et à quantifier, sur l'extraction du LAI, l'impact : (1) des bandes spectrales, (2) de la taille des fenêtres de moyennage et (3) de la modélisation directe du T-R.

IV.2 GENERALITES SUR LE PROCESSUS D'INVERSION

La compréhension des mécanismes physiques des signaux **Y** mesurés sur les surfaces naturelles, permet de retrouver les valeurs des variables d'état **X** à l'origine des images de télédétection. Ainsi, dans le domaine spectral du rayonnement solaire réfléchi, un modèle T-R simule, en mode direct, les processus radiatifs au sein d'un système divisé en quatre ensembles plus ou moins corrélés :

- La source principale de rayonnement (soleil);
- L'atmosphère;
- Le paysage terrestre;
- Le capteur (spatial ou aéroporté).

La formulation d'un modèle T-R peut donc s'écrire sous la forme d'une fonction mathématique *f* qui décrit les mesures **Y** du capteur (luminance et/ou FRD) en fonction des variables d'état **X** du système :

$$\mathbf{Y} = f(\mathbf{X}) \tag{IV-1}$$

X est l'ensemble des variables nécessaires à la description exacte de l'état du système à l'échelle à laquelle il est observé. Il inclut : les conditions d'éclairement solaire (θ_s,φ_s), les propriétés optiques (fonction de phase des aérosols, réflectance et transmittance foliaire) et géométriques (taille, orientation, densité, *etc.*) des éléments constituants l'atmosphère et le paysage terrestre (végétation, sol) avec lesquels le rayonnement interagit, et les propriétés radiométriques (réponse spectrale, FTM) et géométriques (θ_v,φ_v) du capteur.

Le processus d'inversion consiste à retrouver une ou plusieurs variables d'état **X** en inversant numériquement le modèle *f* :

$$\mathbf{X} = f^{-1}(\mathbf{Y}) \tag{IV-2}$$

En théorie, une seule variable d'état X suffit pour décrire une mesure Y. Ce cas "théorique" de milieu parfaitement isotrope n'intervient jamais en pratique en raison de l'anisotropie des surfaces naturelles. Pour décrire l'ensemble des données de télédétection **Y** acquises sur ces surfaces, le modèle *f*, utilisé pour simuler leur réflectance, requiert *n* variables d'état. Ceci entraîne une sous estimation du problème (*i.e.* le nombre d'inconnues est supérieur au nombre d'équations) et donc une impossibilité d'inverser *f*. Pour remédier à cette contrainte, l'approche classique consiste à augmenter le nombre de mesures *m* pour obtenir un système de *m* équations à *n* inconnues (Verstraete et al., 1996) :

$$\begin{aligned}
\mathbf{Y}_1 &= f(X_1^1, X_2^1, \ldots, X_n^1) \\
\mathbf{Y}_2 &= f(X_1^2, X_2^2, \ldots, X_n^2) \\
&\ldots \\
\mathbf{Y}_m &= f(X_1^m, X_2^m, \ldots, X_n^m)
\end{aligned} \tag{IV-3}$$

Dans ces conditions, le modèle ne peut toujours pas être inversé car soit (1) les Y_i valeurs sont identiques (avec des variations de l'ordre des erreurs de mesure et des incertitudes de modélisation) et l'augmentation du nombre de mesures ne génère pas d'informations supplémentaires, soit (2) les Y_i valeurs sont différentes en raison du changement des variables d'état **X** et donc des conditions initiales du système. Ceci implique l'utilisation d'au moins une grandeur mesurée **I**, indépendante des autres variables **X**, associée à une des quatre dimensions définies en télédétection : spatiale, temporelle, spectrale et directionnelle. La plupart des modèles de FRD utilisent simultanément plusieurs variables indépendantes (*e.g.* directions d'éclairement et de visée). Le signal ainsi simulé s'écrit :

$$\mathbf{Y} = f(\mathbf{I}, \mathbf{X}) \tag{IV-4}$$

Prenons l'exemple d'un capteur multispectral monodirectionnel, qui acquiert des informations selon *m* configurations solaires et de visée, notées respectivement *s* et *v*. Ces mesures étant réalisées sur un laps

de temps relativement court, **X** reste constant lors des *m* survols du site. Le système d'équations (IV-4) devient :

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_1 &= f(I_{s1}, I_{v1}; X_1, X_2, \ldots, X_n) + \xi_1 \\ \mathbf{Y}_2 &= f(I_{s2}, I_{v2}; X_1, X_2, \ldots, X_n) + \xi_2 \\ &\ldots. \\ \mathbf{Y}_m &= f(I_{sm}, I_{vm}; X_1, X_2, \ldots, X_n) + \xi_m \end{aligned} \qquad \text{(IV-5)}$$

où ξ_i avec $i \in [1; m]$ représentent les erreurs de mesures et les limitations du modèle *f*.

Afin de faciliter le processus d'inversion, le vecteur **X** des *n* paramètres du modèle est divisé en deux vecteurs :

- **P** le vecteur des *t* paramètres libres que l'on cherche à extraire et,
- **U** le vecteur des *o* paramètres fixes (dont les valeurs sont déterminées à partir des mesures).

Le choix de ces deux types de paramètres dépend principalement du modèle *f* utilisé et de l'intérêt thématique du paramètre. Néanmoins, les configurations d'éclairement et d'observation ainsi que les caractéristiques intrinsèques du capteur (bandes spectrales) sont des paramètres fixes. De plus, les plages de valeurs de ces paramètres doivent être connues avec précision. Au contraire, pour optimiser les résultats d'inversion, tout paramètre (non connu avec précision) influençant fortement *f* en mode direct, sera placé parmi les **P** paramètres libres.

Si $m < t$, il n'existe pas de solution car le système est sous estimé. Quand $m = t$, le système n'admet généralement pas de solution soit (1) à cause des valeurs non nulles de ξ_i sur **I** ou **Y** soit (2) à cause des limites du modèle *f*. Si $m > t$, il n'existe pas de solution analytique car le système est surestimé. Dans ce cas, il est recherché le vecteur **P** qui minimise la fonction coût :

$$\varepsilon^2 = \sum_{i=1}^{m} W_i [Y_i - f(\mathbf{I}_i, \mathbf{U}_i, \mathbf{P})]^2 \qquad \text{(IV-6)}$$

où W_i est le poids donné à l'observation Y_i.

Pour résoudre ce problème, plusieurs méthodes de minimisation peuvent être utilisées (*e.g.* méthodes des moindres carrés et du simplexe), à condition que (1) le modèle *f* reproduit assez finement les observations et (2) que ces dernières varient suffisamment pour contraindre la procédure d'inversion.

IV.3 METHODE D'INVERSION MULTISPECTRALE

La méthode d'inversion s'articule en trois étapes majeures :

- Calcul et stockage des FRD simulés par DART pour tout jeu de paramètres (**I**, **U**, **P**) du couvert forestier présent dans tout pixel : FRD = f (**I**, **U**, **P**).
- Représentation des FRD DART par un modèle analytique à six ou huit coefficients.

- Inversion des paramètres libres (**P**) par interpolation des coefficients du modèle et par minimisation de la fonction coût ε^2 entre les réflectances mesurées et celles générées par le modèle analytique.

IV.3.1 Maquettes pour la génération des LUT

Trois types de maquettes sont disponibles pour générer les tables pré-calculées :

- la maquette "parcelles sol";
- la maquette "herbe";
- la maquette "4 arbres".

- ***Maquette "parcelles sol"***

Chaque maquette est constituée de n_{plot} parcelles (*i.e.* quadrilatères) de sol définies par un type de sol parmi les n_{sol} prédéfinis. Ce type de maquette a été développé pour les études de couverts agricoles avec des résolutions spatiales supérieures aux dimensions des parcelles. Cette approche est cohérente avec le fait que la distribution spatiale des parcelles agricoles et leurs FRD peuvent être entrés dans le module *Maket* par l'intermédiaire de deux modules indépendants :

- "Végétation" (Ader, 2003) qui extrait les géométries des parcelles d'une carte d'occupation du sol et les traduit en coordonnées de l'entité "parcelles de sol";
- "Fit" qui inverse chaque FRD mesuré sur les parcelles en une fonction analytique de type Hapke (Hapke, 1993) pour ensuite l'intégrer au type de sol de chaque parcelle.

Dans le cas où la réflectance d'un sol *k* est supposée lambertienne, elle peut être représentée par un modèle à *n* paramètres : $R_k(\lambda) = \sum_{i=1}^{n} p_{i,k}.R_{k,i}(\lambda)$ où $R_{k,i}(\lambda)$ est prédéfini (base de données, *etc.*) et où $n \in [1; 3]$. Si $n = 1$, la réflectance d'un sol est associée à un seul paramètre libre. Cette formulation linéaire s'appuie sur le fait que certains facteurs (*e.g.* humidité), influençant particulièrement la réponse spectrale du sol, agissent de manière linéaire sur tout le spectre VIS-PIR (Pinty et al., 1989; Jacquemoud et al., 1992a-1992b)

- ***Maquette "herbe"***

Chaque maquette "herbe" est caractérisée par un type de sol parmi les n_{sol} prédéfinis, une couverture herbeuse, une espèce d'herbe parmi les n_h espèces pré définies, les propriétés géométriques de l'herbe (*i.e.* hauteur moyenne et écart type) et le LAI de l'herbe parmi les n_{lh} valeurs discrètes. Une espèce d'herbe est définie par ses propriétés optiques et structurales (LAD).

- ***Maquette "4 arbres"***

Cette scène est constituée de quatre arbres, distribués sur une surface carrée, dont l'aire variable permet d'obtenir différents taux de couverture CC. Trois arbres parmi quatre sont disposés sur la scène, de manière à optimiser les FRD pour toutes configurations d'éclairement et de visée (Estève 1998). Chaque maquette est caractérisée par :

- un type de sol parmi les n_{sol} prédéfinis;
- une espèce herbacée (sous-bois) parmi les n_h espèces pré définies, avec des propriétés géométriques (hauteur et écart type) et un LAI parmi les n_{lh} valeurs discrètes;
- différentes espèces foliaires (feuilles, brindilles *etc*) parmi les n_f espèces pré définies;
- un LAI de l'arbre parmi les n_{la} valeurs discrètes;
- une géométrie du tronc prenant en compte les hauteurs, diamètres sous et à l'intérieur du houppier et leurs propriétés optiques;
- une géométrie des branches et leurs propriétés optiques;
- une forme des houppiers (parmi les 4 prédéfinies): hauteur, diamètre et écarts types associés;
- un taux de couverture arborée CC défini directement parmi les n_{ca} valeurs discrètes.

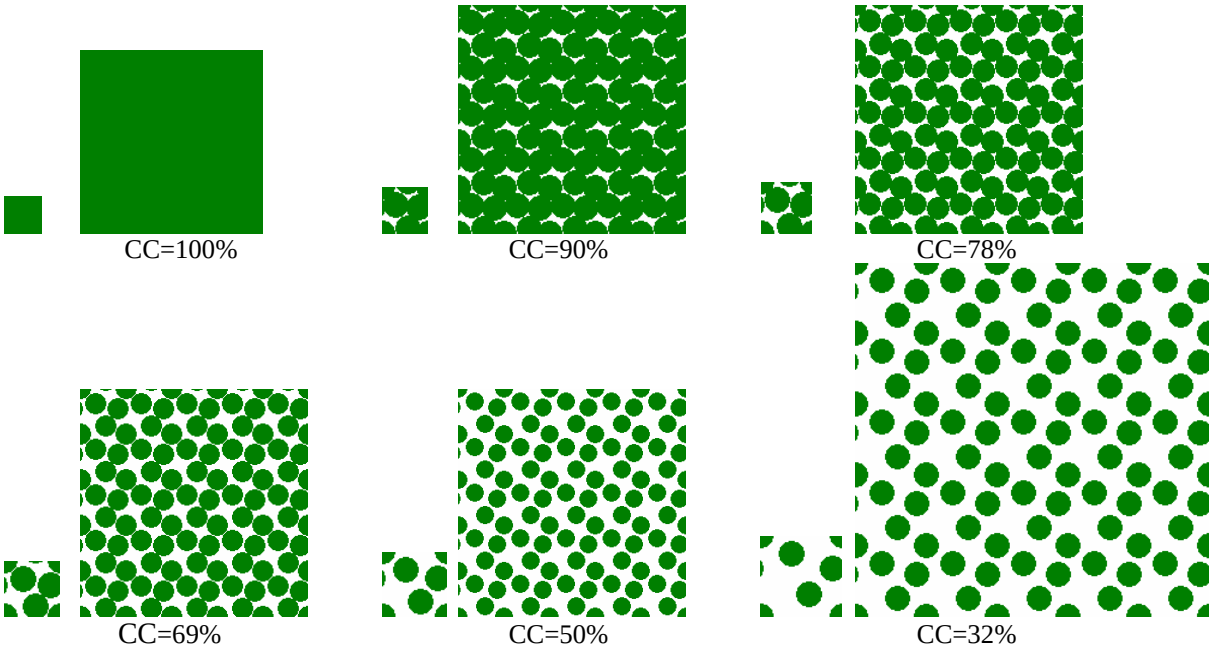


Figure IV-1: Maquettes "4 arbres" (petits motifs) et scènes infinies normalement utilisées par DART (grands motifs) simulées pour des taux de couverture de 100% à 32%.

IV.3.2 Saisie des paramètres

Les paramètres nécessaires à la méthode d'inversion sont entrés de manière interactive ou sous forme de fichier texte. Certains paramètres sont communs aux trois types de maquettes alors que d'autres varient en fonction de la scène simulée.

- ***Paramètres communs***

La quasi-totalité des paramètres d'entrée de chaque module sont accessibles, notamment ceux de DART.

- Paramètres d'entrée du module DART :
    - Mode de fonctionnement (monospectral ou multispectral).
    - Domaine de fonctionnement ("R", "T" ou "R + T").
    - Nombre n_c de bandes spectrales et leur nom.
    - Options (Monte Carlo, atmosphère, *etc*).
    - Produits de DART (FRD, images).
- Nombre n_e des conditions d'éclairement et pour chacune le couple (θ_s,φ_s) et le nombre N_{dir} de directions discrètes.
- Nombre n_{sol} de types de sol et pour chacun :
    - Nom (monospectral) ou fichier de la base de données (multispectral).
    - Type de diffuseur ("lambertien" $\{\rho_{sol};\sigma_{sol}\}$, "lambertien + spéculaire", modèle de Hapke, *etc*) et, propriétés optiques pour le cas monospectral.
    - Températures minimale et maximale.
    - Relief et si oui : nom du fichier MNT.
- Dimensions de la scène et des cellules élémentaires.

- ***Paramètres indépendants (maquette "herbe" et "4 arbres")***

  Maquettes "parcelles sol"

  - Nombre n_{plot} de parcelles et pour chacune :
    - Choix des propriétés optiques parmi les n_{sol} définis précédemment.
    - Géométrie (4 points).

  Maquettes "herbe" et "4 arbres"

  - Géométrie de l'herbe ou du sous-bois (hauteur moyenne, écart type).
  - Nombre n_{lh} de valeurs de LAI/u_f pour l'herbe ou le sous-bois. (Les valeurs négatives font référence à la densité volumique foliaire u_f).
  - Nombre n_h d'espèces herbacées/sous-bois et n_f d'espèces foliaires, avec pour chacune :
    - Distribution angulaire foliaire (ALA si LAD ellipsoïdal et θ_m, ε_m si LAD elliptique);
    - Dimension foliaire;

- Températures minimale et maximale foliaires

D'autres paramètres varient en fonction du mode de fonctionnement de DART. Le mode multispectral donne une plus grande souplesse à la saisie des paramètres car chaque n_h et/ou n_f espèces fait référence à un fichier de la base de données (BDA c*f*. chapitre I) :

- **Mode multispectral :** Saisie pour chaque espèce du nom de fichier de la BDA.
- **Mode monospectral :** Saisie pour chaque espèce :
  - Dans chaque bande spectrale :
    - Réflectances hémisphériques foliaires (faces inférieure et supérieure);
    - Transmittance hémisphérique;
    - Paramètres associés au spéculaire (indices de réfraction n_{inf} et n_{sup}, types de rugosité et coefficients de rugosité k_{inf} et k_{sup});

  Une alternative à la saisie directe des propriétés optiques des feuilles est l'utilisation du modèle de propriétés optiques foliaire PROSPECT. Le couplage de DART avec la version 3.01 (http://membres.lycos.fr/opticleaf/models.htm) du modèle PROSPECT (Jacquemoud et al., 1996-1999-2000), offre la possibilité de simuler deux nouveaux paramètres libres : l'épaisseur équivalente en eau, et la teneur en matière sèche des feuilles. En effet, PROSPECT simule la réflectance et la transmittance foliaire avec un paramètre de structure des feuilles *N*, une concentration en chlorophylle C_{ab} ($\mu g.cm^{-2}$), une épaisseur équivalente en eau C_w ($g.cm^{-2}$), et une teneur en matière sèche C_m ($g.cm^{-2}$). Ce dernier paramètre équivaut à la surface foliaire spécifique (SLA), paramètre important dans les études de croissance des plantes et dans les modèles de fonctionnement des écosystèmes.

  Ce couplage "DART-PROSPECT" permet donc de prendre en compte quatre paramètres libres supplémentaires. Il est alors prédéfini n_N valeurs de *N*, n_{ab} valeurs de C_{ab}, n_w valeurs de C_w, et n_m valeurs de C_m à la fois pour l'herbe ou le sous-bois et les houppiers.

Maquette "4 arbres"

- Nombre n_a d'espèces d'arbre et pour chacune :
  - Géométrie des arbres (dimensions, forme du houppier, nombre de niveaux, *etc*).
  - Propriétés optiques (parmi les n_{sol}) et structurales des troncs (par niveau du houppier) et des branches.
  - Propriétés optiques (parmi les n_f) et structurales des brindilles.
- Nombre n_{la} de valeurs de LAI de l'arbre et ses valeurs, avec la possibilité de faire varier la densité volumique foliaire u_f (valeur négative) à la place du LAI. En effet, u_f est une caractéristique de l'arbre alors que le LAI dépend de u_f et de CC.

- Nombre n_{ca} de taux de couverture CC et ses valeurs.

IV.3.3 Représentation des FRD par un modèle analytique

L'algorithme de minimisation nécessite la connaissance de la réflectance du couvert pour tout ensemble de valeurs des paramètres d'entrée sur toute leur plage de variation. Vu les contraintes "temps de calcul/précision", seul un nombre limité de simulations est généré pour des valeurs discrètes des paramètres d'entrée. Ces dernières sont interpolées pour obtenir les valeurs intermédiaires. Néanmoins, en raison du phénomène de *hot spot*, cette interpolation n'est pas directement applicable pour les angles solaires. Pour chaque jeu de paramètres d'entrée, la FDRB $R(\theta_v,\Delta\varphi_{sv})$ du paysage simulé est donc reconstituée par un modèle à six ou huit coefficients c_i :

$$R(\theta_v,\Delta\varphi_{sv}) = \left(c_1 + c_2\theta_v\cos(\Delta\varphi_{sv}) + c_3\theta_v^2\cos^2(\Delta\varphi_{sv}) + c_4\theta_v^2\sin^2(\Delta\varphi_{sv}) + c_5\theta_v^4\sin^4(\Delta\varphi_{sv}) + c_6\theta_v^6\sin^6(\Delta\varphi_{sv})\right)\times\left(1 + c_7\left[1 + \frac{1}{c_8}\tan^2\left(\frac{\psi_{sv}}{2}\right)^{-1}\right]\right) \quad \text{(IV-7)}$$

$$\Delta\varphi_{sv} = \varphi_s - \varphi_v \;;\; \cos(\psi_{sv}) = \Omega_s.\Omega_v$$

Sa formulation est le produit d'une fonction "bol" classique, symétrique par rapport au plan d'incidence, et du terme $\left(1 + c_7\left[1 + \frac{1}{c_8}\tan^2\left(\frac{\psi_{sv}}{2}\right)^{-1}\right]\right)$ représentant le *hot spot*, défini par sa hauteur c_7 et sa largeur c_8. Le modèle à six coefficients (*i.e.* avec $c_5 = c_6 = 0$) permet de diminuer les temps de calcul tout en conservant une bonne précision. Les coefficients c_i sont calculés par la méthode des moindres carrés, en minimisant l'erreur entre les FRD DART et $R(\theta_v,\Delta\varphi_{sv})$. Cette étape et le stockage de chaque ensemble de c_i dans la LUT, est répétée pour chaque bande spectrale, angle solaire et valeur de paramètre libre. La comparaison des deux modèles et la sélection des procédures d'interpolation (polynomiale, spline cubique et à dérivée première imposée et continue) sont décrites précisément par Estève (1998).

IV.3.4 Inversion des paramètres libres (P)

La méthode d'inversion peut être appliquée sur tout ou partie (masque) d'images multispectrales et/ou multidirectionnelles. La procédure d'inversion est conçue pour minimiser la fonction coût entre les FRD mesurés et ceux générés par le modèle à six ou huit coefficients. Trois types d'erreur peuvent être représentés :

- Erreur absolue :

$$\varepsilon^2 = \sum_{i=1}^{N_{val}} \left(\rho_i - R(\theta_{si},\, \theta_{vi},\, \Delta\varphi_{svi},\, \lambda_i,\, \mathbf{P})\right)^2 \quad \text{(IV-8)}$$

  où N_{val} est le nombre de réflectances mesurées avec ρ_i la ième valeur, associée aux angles solaire θ_{si} et de visée θ_{vi}, $\Delta\varphi_{svi}$ pour la longueur d'onde λ_i et le vecteur de paramètre libre **P**.

- Erreur relative :

$$\varepsilon^2 = \sum_{i=1}^{N_{val}} \left(\frac{\rho_i - R(\theta_{si},\, \theta_{vi},\, \Delta\varphi_{svi},\, \lambda_i,\, \mathbf{P})}{\rho_i}\right)^2 \quad \text{(IV-9)}$$

Cette fonction coût est conçue pour ne pas favoriser les canaux PIR pour la végétation.

- Erreur relative avec seuil :

$$\varepsilon^2 = \sum_{i=1}^{N_{val}} \left(\frac{\rho_i - R(\theta_{si}, \theta_{vi}, \Delta\varphi_{svi}, \lambda_i, \mathbf{P})}{k_i} \right)^2 \qquad \text{(IV-10)}$$

avec $k_i = \rho_i$ si $\rho_i \geq \rho_{min}$ sinon $k_i = \rho_{min}$. Le seuil ρ_{min}, fixé par l'utilisateur, a été introduit pour ne pas favoriser les réflectances proches de zéro.

L'algorithme de minimisation utilisé est celui du simplexe (Nelder & Mead, 1965), tiré de Press et al., (1992). Cette technique d'optimisation non linéaire est plus robuste et fiable et, nécessite moins d'informations *a priori* que les approches telles que la méthode des moindres carrés. Un simplexe est un élément géométrique de dimension $N + 1$ construit à partir de $N + 1$ points distincts dans un espace à N dimensions. La méthode commence à traiter le 1er simplexe, défini parmi S simplexes initiaux fixés par l'opérateur, et calcule pour ses $N + 1$ points la fonction coût ε^2. La procédure fait ensuite évoluer le point donnant le maximum de ε^2 en effectuant différentes transformations géométriques par rapport au barycentre des autres points. Une fois que tous les points du 1er simplexe ont été traités et que l'erreur relative entre les valeurs maximale et minimale de ε^2 en ces points est inférieure à un seuil fixé par l'opérateur, la procédure est répétée avec un autre simplexe. Ce processus est réitéré jusqu'à ce que tous les simplexes aient été traités, le minimum retenu étant alors le plus petit des minima calculés.

Vu les trois procédures d'interpolation utilisées, la valeur de chaque paramètre libre doit être comprise entre les valeurs extrêmes utilisées pour les simulations.

La robustesse de la procédure d'inversion peut être testée de manière théorique, en ajoutant deux types de bruit blanc aux réflectances simulées : un bruit additif associé au capteur radiométrique, et un bruit proportionnel modélisant les corrections atmosphériques. Ce type de test est particulièrement utile pour régler certains paramètres de la méthode d'inversion, tel que le nombre S de simplexes initiaux et/ou le seuil d'arrêt de la procédure d'inversion. Il peut également servir à modifier le modèle de sol et/ou les paramètres libres, pour améliorer la robustesse de la méthode d'inversion. Ce test fournit, pour chaque paramètre libre, l'erreur quadratique moyenne (RMSE) absolue, le coefficient de corrélation r^2 et les coefficients (a et b) de la droite de régression. Il donne aussi le RMSE calculé entre les réflectances simulées et mesurées :

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_{val}} \{\rho_i - R(\theta_{si}, \theta_{vi}, \Delta\varphi_{svi}, \lambda_i, \mathbf{P})\}^2}{N_{val}}} \qquad \text{(IV-11)}$$

IV.3.5 Organigramme de la procédure d'inversion

L'organigramme du programme d'inversion se divise en deux parties (*Figure IV-3*) :

(1) Génération des LUT. Elle crée de manière quasi-automatique N_{sim} simulations, stockées dans une arborescence spécifique (*Figure IV-2*). N_{sim} varie en fonction du mode de fonctionnement de DART : n_e x n_m x n_h x n_{lh} x n_a x n_{la} x n_{ca} (multispectral) et n_e x n_m x n_h x n_{Nh} x n_{abh} x n_{wh} x n_{mh} x n_{lh} x n_a x n_{Na} x n_{aba} x n_{wa} x n_{ma} x n_{la} x n_{ca} (monospectral). En dehors de la procédure d'inversion, elle est également très utile pour effectuer des études de sensibilité avec DART.

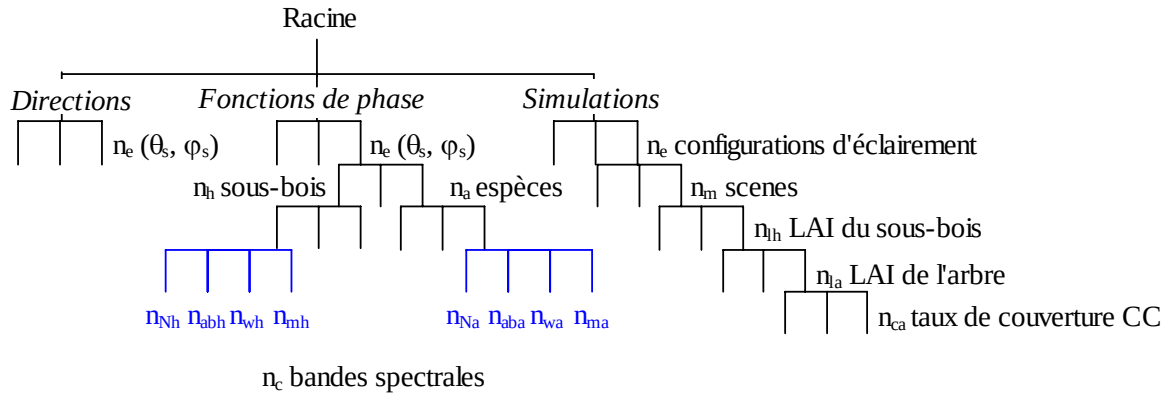


Figure IV-2: Arborescence spécifique pour le stockage des fichiers DART. En bleu, les paramètres du modèle PROSPECT.

(2) Détermination des paramètres libres optimaux par pixel. Le nombre maximal de paramètres libres varie aussi suivant le mode de fonctionnement de DART : LAI_h, LAI_a/u_f, CC et ρ_{sol} (multispectral) et C_{abh}, N_h, C_{wh}, C_{mh}, LAI_h, C_{aba}, N_a, C_{wa}, C_{ma}, LAI_a/u_f, CC, ρ_{sol} (monospectral).

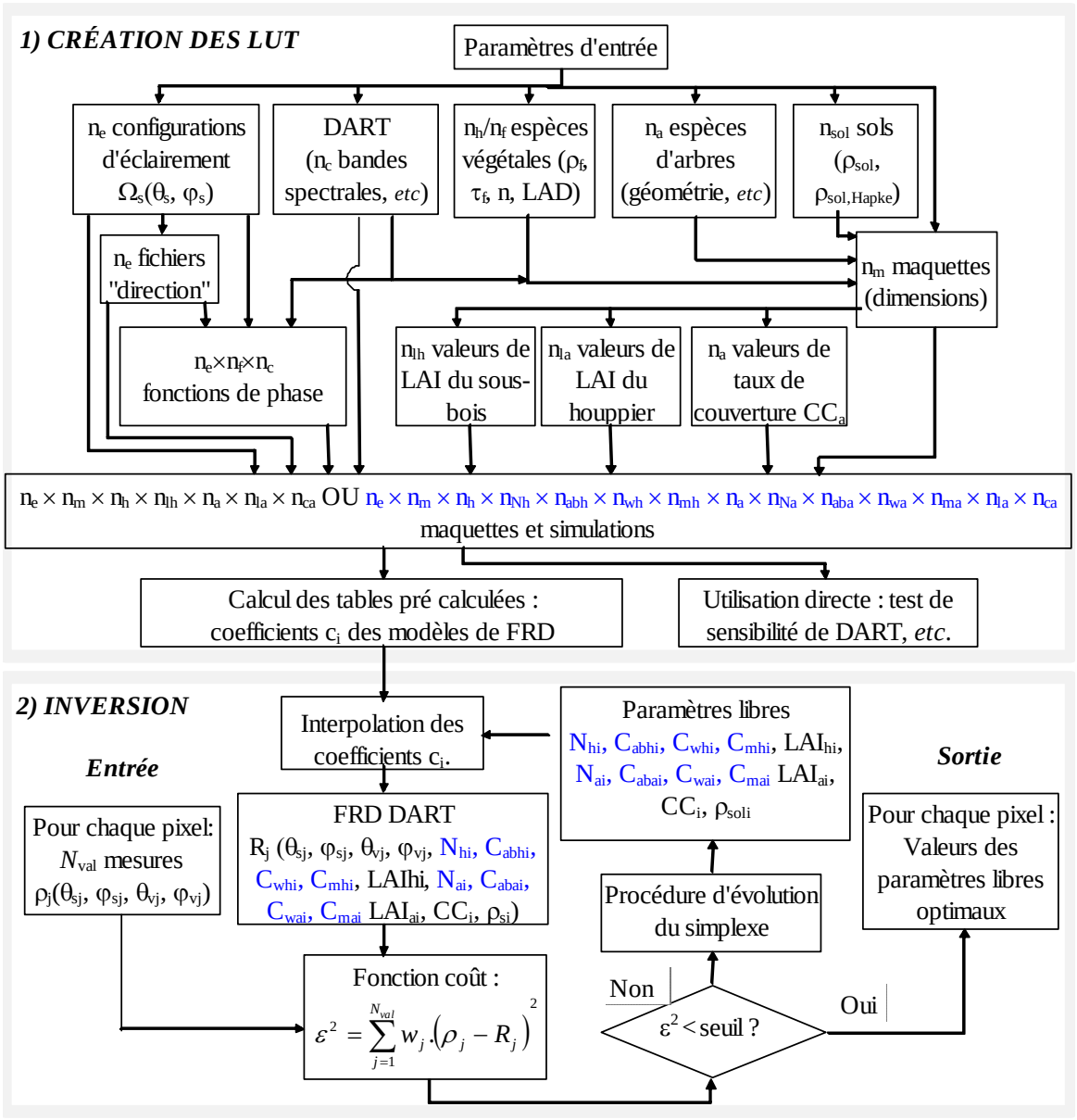


Figure IV-3: Organigramme du programme d'inversion. Création des LUT (haut) et inversion (bas). En bleu, les paramètres du modèle PROSPECT.

IV.4 MATERIELS ET METHODE

Après avoir présenté le site d'étude et les données disponibles, les objectifs de cette étude sont décrits, en insistant sur les difficultés liées à l'inversion des données hyperspectrales THR. La méthodologie utilisée pour retrouver le LAI est ensuite détaillée.

IV.4.1 Données disponibles

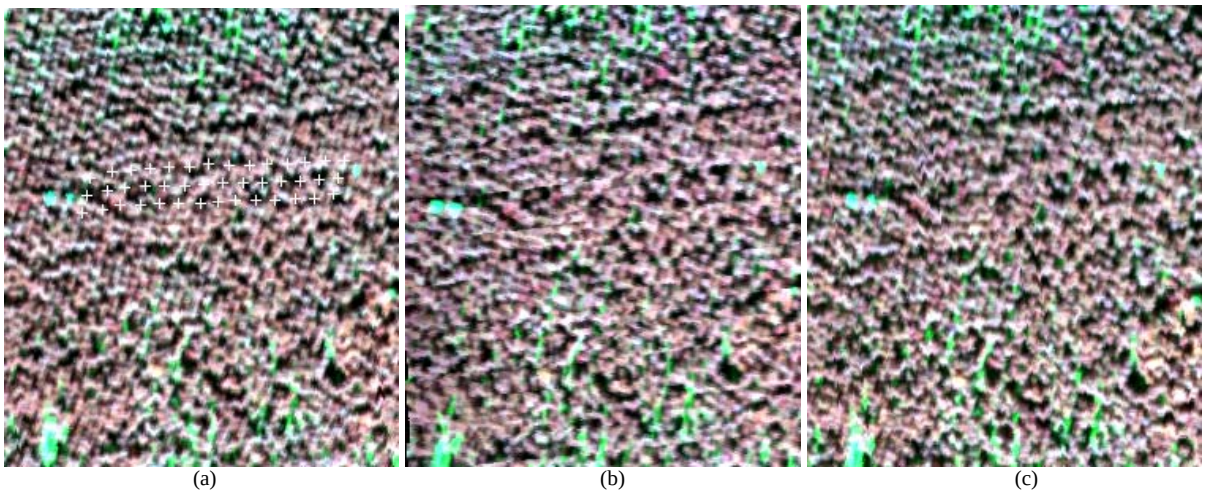
- ***Site d'étude et mesures terrain***

La zone d'investigation est une parcelle de sapins de Norvège (stade productif : 27 ans) sélectionnée sur le site de Bily Kriz (République Tchèque; 18.54°E, 49.50°N, 936m d'altitude). Durant l'été 2004,

une campagne intensive de mesures s'y est déroulée, permettant de déterminer de nombreux paramètres optiques et structuraux, dont l'indice foliaire. Les mesures du LAI ont été réalisées sur 42 points (distants de 5m), répartis sur 3 transects parallèles échantillonnant une zone de 75x10m^2 (*Figure IV-4*-a). Elles ont été obtenues par deux méthodes indirectes utilisant (1) le traitement des photographies hémisphériques par le logiciel CAN-EYE et (2) l'instrument Li-Cor LAI 2000. En fait, les mesures "Li-Cor" se sont avérées être très imprécises. Par suite, seuls les mesures "Can-Eye" ont été utilisées dans ce travail.

- ***Données aéroportées***

Les travaux présentés dans ce chapitre utilisent les données du spectroradiomètre imageur aéroporté hyperspectral AISA Eagle (Imageur Spectral, SPECIM Ltd., Finland) acquises selon trois axes de vol (*Figure IV-4*) le 18 septembre 2004 à 11:50 (GMT). Ces images nadirs, obtenues sous un ciel clair (V > 30km) avec un éclairement solaire (θ_s=47.8°; ϕ_s=176.5°), couvrent 64 bandes spectrales entre 398.39 et 983.06 nm avec une résolution spatiale de 40 cm. La superficie observée est de 116x100 m^2 (290x250 pixels). Ces images sont corrigées des effets atmosphériques et des déformations géométriques associés au déplacement et à l'orientation du capteur. La méthode de correction des effets atmosphériques utilise des cibles de référence au sol (c*f*. chapitre III). Elle a permis de retenir 39 bandes spectrales, réparties entre 398.39 et 783.44 nm, étant donné les écarts obtenus entre les FRD AISA corrigées des effets atmosphériques et ceux mesurés sur les cibles de référence au sol.



(a) (b) (c)

Figure IV-4: Trois images AISA (corrigées des effets géométriques et radiométriques) acquises selon trois axes de vols : a) Est-Ouest, b) Nord-Sud, c) Ouest-Est. Composition colorée RGB (783.44-670.74-559.08 nm). 42 points de mesures du LAI notés par (+).

IV.4.2 Objectifs de l'étude

L'objectif majeur de l'étude a été d'évaluer l'impact de la meilleure modélisation DART des couverts arborés sur la précision du LAI obtenue par inversion. Pour cela, les arbres sont modélisés selon trois modes de représentation (c*f*. chapitre III) :

- Scénario "F" : il simule les houppiers en tant que juxtaposition de cellules turbides foliaires et de cellules "vides";
- Scénario "FW" : il ajoute à "F" la simulation du bois (*i.e.* troncs + branches du 1er ordre);
- Scénario "FWT" : il ajoute à "FW" la simulation des rameaux et brindilles et tient compte de la mixité de matière au sein des cellules (*e.g.* branches + feuilles), en modélisant les "cellules mixtes".

De plus, pour optimiser les temps de calcul et la sélection des paramètres d'entrée, il est utilisé DART en mode multispectral et la procédure d'inversion associée.

IV.4.3 Méthodologie

Pour quantifier l'impact de la modélisation directe du T-R sur l'extraction du LAI, il est tout d'abord nécessaire de paramétrer le modèle DART et de déterminer les paramètres libres et fixes de l'inversion. L'impact des paramètres du schéma d'inversion est ensuite quantifié à partir de tests de robustesse.

- ***Paramètres des simulations DART***

La maquette "4 arbres" est utilisée avec des cellules élémentaires de 20 cm. Les houppiers coniques de hauteur 10.2 (± 1m) et de diamètre inférieur 3.2 (± 0.48m) sont divisés en onze niveaux horizontaux, dans chacun desquels sont assignées des propriétés optiques et structurales (c*f.* chapitre III).

Les maquettes des trois scénarios sont paramétrées (*Tableau IV-1*) à partir de la densité volumique foliaire u_f de manière à couvrir les variations de l'indice foliaire (LAI entre 3 et 15 $m^2.m^{-2}$) et du taux de couverture arborée (CC entre 55 et 95%), mesurés sur la parcelle de conifères. u_f varie donc suivant le scénario simulé.

Scénario - CC [%]	*LAI = 3*	*LAI = 6*	*LAI = 9*	*LAI = 12*	*LAI = 15*
F – 55	2.17	4.35	6.52	8.69	10.86
F – 75	1.59	3.19	4.78	6.37	7.96
F – 95	1.05	2.11	3.16	4.22	5.27
FW – 55	2.67	5.34	8.01	10.68	13.36
FW – 75	1.92	3.85	5.77	7.69	9.62
FW – 95	1.38	2.76	4.13	5.51	6.89
FWT – 55	3.85	7.71	11.56	15.42	19.27
FWT – 75	2.19	5.98	8.97	11.96	14.95
FWT – 95	1.88	3.75	5.63	7.5	9.38

Tableau IV-1: Correspondance entre les valeurs de LAI ($m^2.m^{-2}$) et u_f ($m^2.m^{-3}$) selon les différents CC pour les 3 scénarios.

Même si une simulation DART en mode multispectral est plus rapide que Q simulations monospectrales, le temps d'exécution augmente fortement avec le nombre de bandes spectrales. De plus, vu les temps de traitement de la procédure d'inversion (14h pour une image 290x250 pixels et 2

bandes spectrales sur un ITANIUM-2 64 bits cadencé à 1.66 GHz), il n'est pas concevable de simuler les 39 bandes spectrales sur les 480 (120 + 160 + 200) scènes générées pour les trois scénarios (respectivement "F", "FW", "FWT").

Un compromis est donc réalisé entre les temps de simulation, les tailles des LUT et un nombre de bandes spectrales acceptables pour quantifier leur impact sur la précision des résultats obtenus. A partir des recommandations de Weiss et al., (2000), huit bandes spectrales (*Tableau IV-2*) ont été sélectionnées sur tout le spectre : vert (V), rouge (R), rouge décalé (RE) et proche-infrarouge (PIR).

- ***Paramètres libres et fixes de l'inversion***

Vu que le LAI d'une parcelle dépend à la fois de u_f et de CC, et que ces deux paramètres varient fortement sur la parcelle, ils sont naturellement laissés libres. Le nombre de bandes spectrales simulées permettrait de tester d'autres paramètres libres, tel que les paramètres biochimiques des feuilles (C_{ab}, C_w, et C_m). Néanmoins, nous ne disposions d'aucune référence *in situ* sur ces paramètres, étant donné que les mesures ne concernaient que les réflectance et transmittance hémisphérique foliaire. Nous avons donc décidé de ne pas utiliser les paramètres associés au modèle PROSPECT. De plus, pour éviter toute augmentation de la sensibilité au bruit, les réflectances des différents éléments diffusants sont des paramètres fixes mesurés sur le terrain (*Tableau IV-2*). Aucune variation (zénithale et azimutale) de l'angle solaire n'est considérée ici, car les effets de la distribution spatiale des arbres sont supposés compensés par les forts CC de la parcelle d'étude.

Paramètres	*Unités*	*Valeurs*							
Paramètres libres	-								
Densité volumique foliaire u_f	$m^2.m^{-3}$	**F**		**FW**			**FWT**		
		1, 3, 5, 7, 9, 11		1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15			1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 20		
Taux de couverture CC	%	45, 55, 75, 95, 100							
Paramètres fixes	-								
Angle zénithal solaire θ_s	(°)	137.8							
Numéro de bande		**B15**	**B27**	**B33**	**B34**	**B35**	**B36**	**B37**	**B39**
Bande centrale	nm	559.08	670.74	726.76	736.11	745.45	754.88	764.4	783.44
*Réflectance des feuilles ρ_f	%	10.47	3.94	29.28	32.78	34.59	35.35	35.62	35.74
*Transmittance des feuilles τ_f	%	4.3	0.043	26.85	31.34	33.81	34.98	35.52	35.97
Réflectance du sol ρ_{sol}	%	8.59	11.23	17.08	17.92	18.7	19.35	19.97	21
Réflectance des troncs ρ_t	%	13.27	21.25	31.85	33.17	34.38	35.54	36.69	38.86
Réflectance des branches ρ_b	%	14.4	20.7	31.83	33.02	34.08	35.06	36.	37.8
Réflectance des brindilles ρ_{twig}	%	14.59	27.68	37.27	38.82	40.41	41.9	43.48	46.24

*Tableau IV-2: Paramètres d'entrée des simulations DART. *Les propriétés optiques des feuilles sont données en tant que valeur moyenne sur la hauteur du houppier.*

- ***Impact du schéma d'inversion***

Des tests de robustesse ont été effectués pour quantifier l'impact du schéma d'inversion sur l'extraction du LAI, de la densité volumique foliaire u_f et du taux de couverture arborée CC. Ils ont permis de vérifier : (1) la faisabilité théorique de l'inversion et les paramètres optimaux (fonction coût) du

schéma d'inversion, (2) une éventuelle corrélation entre bandes ainsi que l'apport des huit bandes spectrales sélectionnées par rapport à une configuration spectrale minimale et (3) l'impact du scénario de modélisation sur l'extraction des paramètres libres.

Ces tests "théoriques" sont réalisés en générant un jeu de données synthétiques bruitées, pour chaque paramètre libre. Les résultats sont analysés à partir des calculs du RMSE absolu et du coefficient de corrélation r^2 entre les valeurs réelles des paramètres libres et celles obtenues par inversion de ces données bruitées. Ces comparaisons sont effectuées entre les configurations spectrales minimale à 2 bandes (2 paramètres libres) et maximale (8 bandes) des deux scénarios extrêmes : "F" et "FWT". Le capteur AISA ne disposant pas de canaux MIR, la configuration spectrale minimale à deux bandes a été choisie à partir de la relation classique "NDVI-LAI": B27 (670.74 nm) et B39 (783.44 nm). Le modèle analytique utilisé est celui à six coefficients. La fonction coût représente quatre types d'erreur : (1) erreur absolue, (2) erreur relative, (3) erreur relative avec un seuil inférieur sur la réflectance ρ_{min} de 3% et (4) erreur relative avec ρ_{min} = 10%. Le nombre de simplexes initiaux a été fixé à 10 pour le scénario "F" et 5 pour le scénario "FWT", avec un seuil d'arrêt de la procédure de recherche de minimum égal à 0.001. Dix valeurs par paramètres ont été utilisées, u_f ($m^2.m^{-3}$) variant entre 1 et 11 (F), 1 et 20 (FWT) et CC variant entre 45 et 100% (*Tableau IV-2*). Pour chaque couple (u_f, CC), cent valeurs aléatoires de bruit blanc proportionnel ont été systématiquement appliquées aux réflectances spectrales synthétiques. En pratique, l'expression de R_λ dans les équations (IV-8) à (IV-10) devient $R'_\lambda = R_\lambda + \Delta R_\lambda$ avec $|\Delta R_\lambda| < E.R_\lambda$. De plus, vu la procédure de correction des effets atmosphériques, le niveau de bruit E est limité à 5% avec des valeurs égales à : 0, 2.5 et 5%.

- ***Échantillonnage spatial***

Étant donné la résolution spatiale particulièrement fine des images AISA (40 cm), la procédure d'inversion n'est pas appliquée directement sur les images brutes. En effet, un tel processus entraînerait une forte variabilité spatiale du LAI. Pour remédier à ce problème, les images sont prétraitées et moyennées sur des fenêtres 3 x 3, 5 x 5, 7 x 7, 9 x 9, 11 x 11, 13 x 13 et 25 x 25 pixels, correspondant ainsi à des images de résolutions spatiales plus grossières, respectivement : 1.2, 2, 2.8, 3.6, 4.4, 5.2 et 10 m. Pour les trois scénarios, l'influence de la taille des fenêtres de moyennage est quantifiée sur l'extraction du LAI.

- ***Comparaison avec les LAI mesurés***

Les différences entre les mesures *in situ* et les valeurs de LAI estimés par inversion sont quantifiées en terme d'erreur quadratique moyenne (RMSE_LAI) absolue et relative et de coefficient de corrélation (r^2_LAI). Les LAI estimés pour chaque pixel sont moyennés sur des disques de diamètre 9.6 m, centrées sur les 12 points du transect médian (*Figure IV-4a*). Ces surfaces circulaires correspondent aux empreintes de l'instrument CAN EYE.

IV.5 RESULTATS ET DISCUSSION

IV.5.1 Impact du schéma d'inversion : Données non bruitées

La *Figure IV-5* compare, entre les scénarios de modélisation "F" et "FWT", l'impact des huit bandes (8b) spectrales par rapport à une configuration à deux bandes (2b) sur l'extraction du LAI, de la densité volumique u_f foliaire et du taux de couverture CC, pour quatre fonctions coûts. Ces tests "théoriques" sont réalisés à partir d'un jeu de mesures synthétiques non bruitées. La précision et la qualité du "fit" sont quantifiées en terme d'erreurs quadratiques moyennes absolues (RMSE) et de coefficients de corrélation r^2 associés au LAI (RMSE_LAI, r^2_LAI), à u_f (RMSE_u_f, r^2_u_f) et au CC (RMSE_CC, r^2_CC).

La *Figure IV-5* montre clairement que dans le cas théorique de données non bruitées du scénario "FWT", CC est bien obtenu quel que soit la fonction coût et le nombre de bandes, alors que son extraction avec les données du scénario "F" dépend fortement du schéma d'inversion. Au contraire, u_f et surtout l'indice foliaire sont plus difficilement accessibles du moins pour le scénario "F". En effet, à partir d'un CC de l'ordre de 75% et d'un u_f de 6.5 $m^2.m^{-3}$, les LAI estimés sont systématiquement biaisés, avec des écarts pouvant atteindre la valeur du LAI simulé. Ces tendances sont cohérentes avec les courbes concaves "FRD-LAI" du chapitre III, associant deux valeurs de LAI à un même FRD. La solution du problème n'étant pas unique, la procédure d'inversion s'arrête donc, soit sur la valeur "vraie", soit sur une valeur totalement erronée. L'utilisation d'une fonction coût paramétrique pourrait contraindre la solution (Combal et al., 2003; Meroni et al., 2004). Néanmoins, cette méthode reste empirique et valable pour un seul jeu de données. En outre, la modélisation plus précise des intéractions "onde-matière" du scénario "FWT" qui induit des courbes "FRD-LAI" décroissantes monotones, permet d'aboutir à une solution unique du problème. Ainsi, pour la fonction coût représentant l'erreur relative, la variation 2b/8b du RMSE_LAI diminue de 5.3/6.05% pour le scénario "F" à 0.19/0.21% pour "FWT". Les mêmes tendances sont observées pour r^2_LAI : 0.73/0.71 (F) et 0.998/0.998 (FWT).

Quel que soit le paramètre libre, l'impact des bandes spectrales reste faible, comparé à la forte sensibilité de la procédure d'inversion à la fois au scénario de modélisation et à la fonction coût utilisée. Toutefois, l'augmentation du nombre de bandes tend à dégrader la qualité de l'inversion pour les quatre erreurs testées, excepté pour CC avec le scénario "FWT" et la fonction coût "erreur relative". Dans ce cas, RMSE_CC diminue de 0.039 (2b) à 0.02 (8b) et r^2_CC augmente de 0.948 (2b) à 0.985 (8b). D'une manière générale, l'erreur absolue est plus sensible au nombre de bandes que l'erreur relative qui est mieux adaptée au schéma d'inversion à huit bandes.

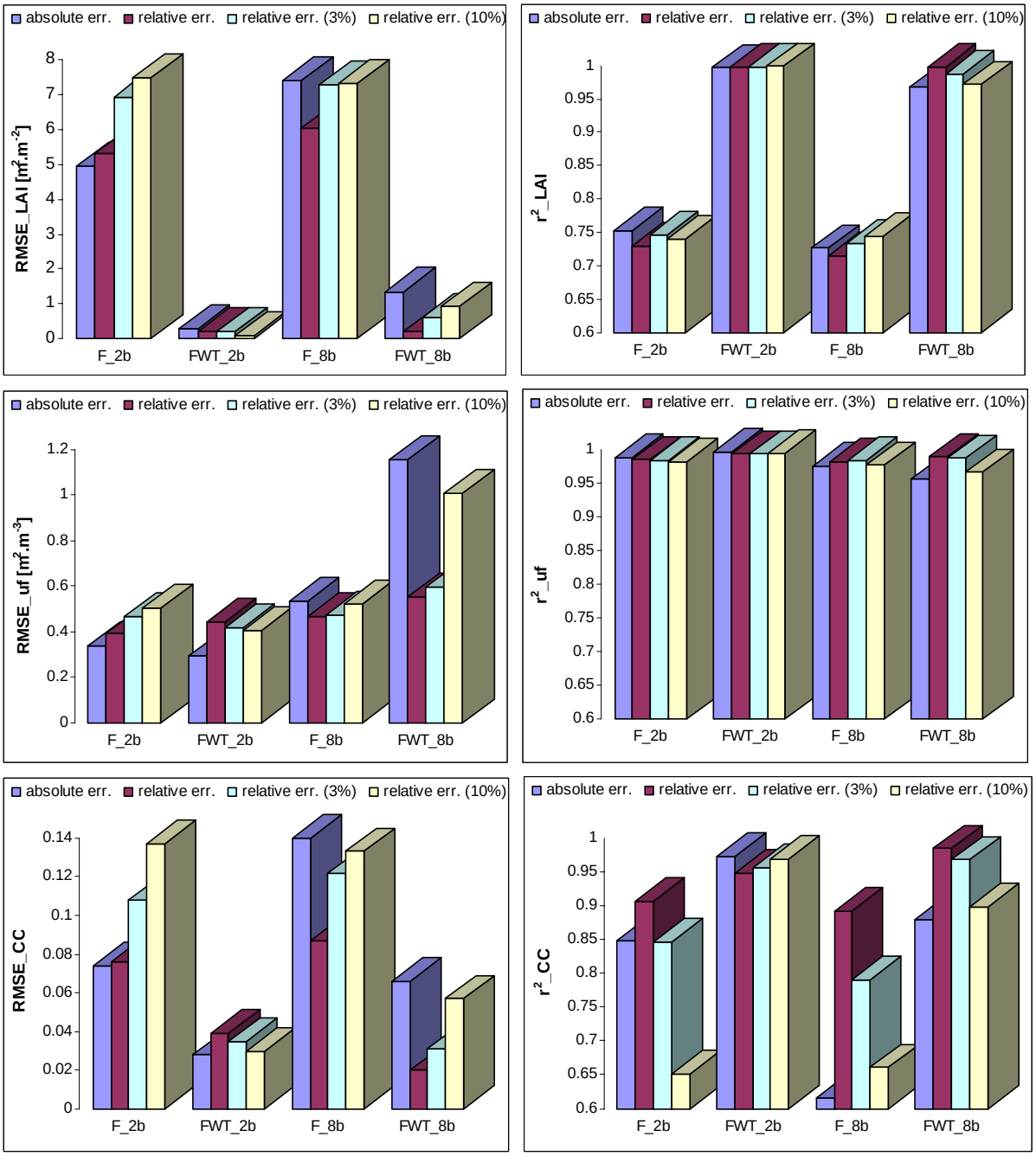


Figure IV-5: Comparaison entre les scénarios "F" et "FWT" de l'impact du schéma d'inversion (2b: 2 bandes et 8b: 8 bandes, 4 fonctions coût) sur les RMSE absolus et r^2 associés au LAI, u_f et CC calculés à partir d'un jeu de données synthétiques non bruitées.

IV.5.2 Impact du schéma d'inversion : Données bruitées

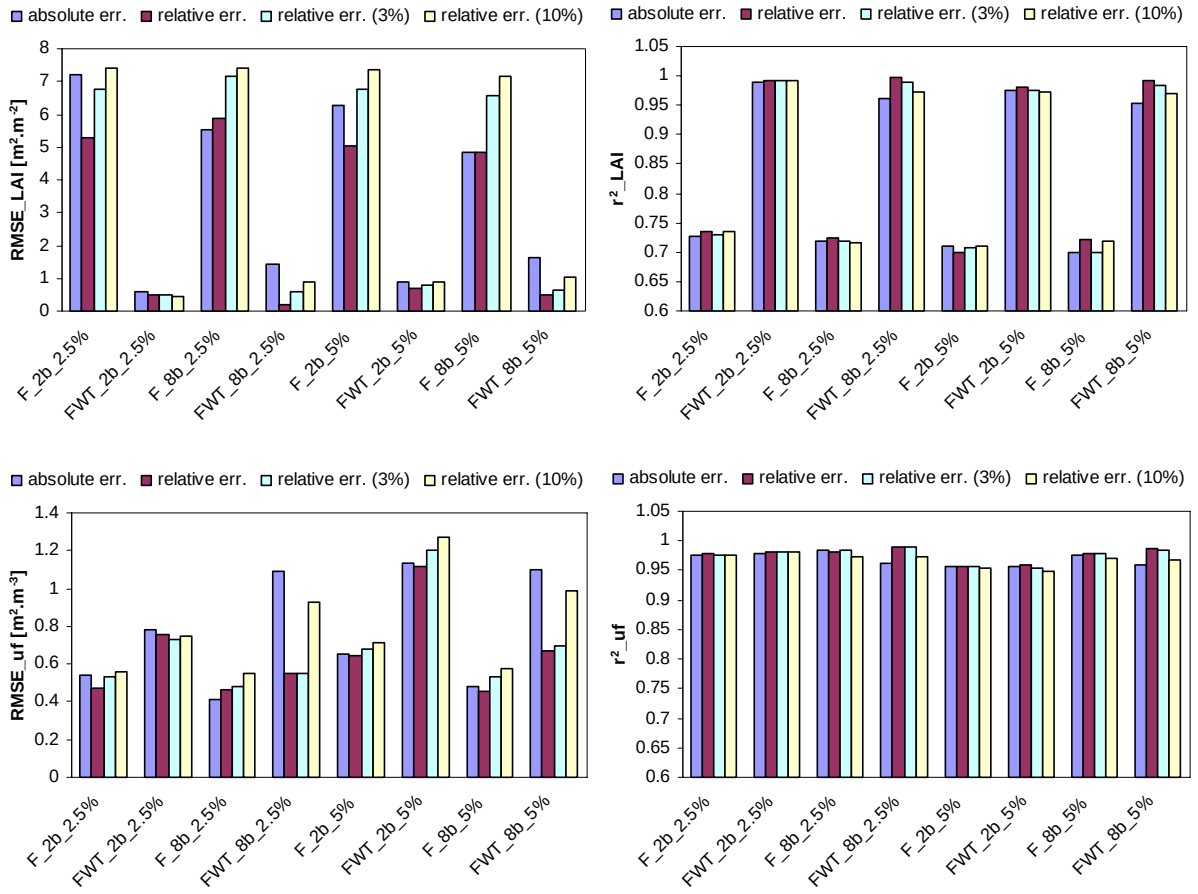
En présence d'un niveau *E* de bruit proportionnel inférieur ou égal à 5%, la *Figure IV-6* illustre de manière évidente, la plus grande fiabilité du scénario "FWT" pour les deux échantillonnages spectraux, quel que soit le paramètre recherché. Ainsi, avec *E* = 5% et la fonction coût représentant l'erreur relative, il est théoriquement possible de retrouver le LAI car les valeurs de RMSE_LAI sont assez faibles et comprises entre 0.708 $m^2.m^{-2}$ (2b) et 0.478 $m^2.m^{-2}$ (8b). De même, la qualité de

l'inversion est excellente avec des r^2_LAI toujours supérieurs à 0.98 : 0.981 (2b) et 0.992 (8b). Au contraire, le scénario "F" est moins bien adapté quel que soit le paramètre recherché, avec des valeurs de RMSE (r^2) systématiquement supérieures (inférieures) pour toute configuration.

La *Figure IV-6* montre aussi clairement que l'échantillonnage spectral à huit bandes est beaucoup moins sensible au bruit que l'échantillonnage minimal à deux bandes, notamment pour la fonction coût "erreur relative". Avec un niveau de bruit égal à 2.5%, les RMSE_LAI du scénario "FWT" varient, pour les quatre erreurs, de 0.61/0.485/0.435/0.495 $m^2.m^{-2}$ (2b) à 1.442/0.215/0.909/0.589 $m^2.m^{-2}$ (8b). Pour E = 5%, ils évoluent de 0.866/0.708/0.875/0.808 $m^2.m^{-2}$ (2b) à 1.606/0.478/1.014/0.64 $m^2.m^{-2}$ (8b).

On peut noter également que pour les paramètres LAI et u_f, la précision de l'inversion (RMSE) est beaucoup plus sensible au type d'erreur que la qualité du "fit" (r^2), contrairement à CC, qui exhibe une forte variabilité du RMSE et du r^2.

Ces tests théoriques se sont avérés très utiles pour déterminer le schéma "optimal" d'inversion : huit bandes spectrales et une fonction coût qui représente l'erreur relative. Toutefois, rien ne nous permet d'affirmer qu'en utilisant ce schéma et les FRD du scénario "FWT", les LAI estimés et mesurés coïncident.



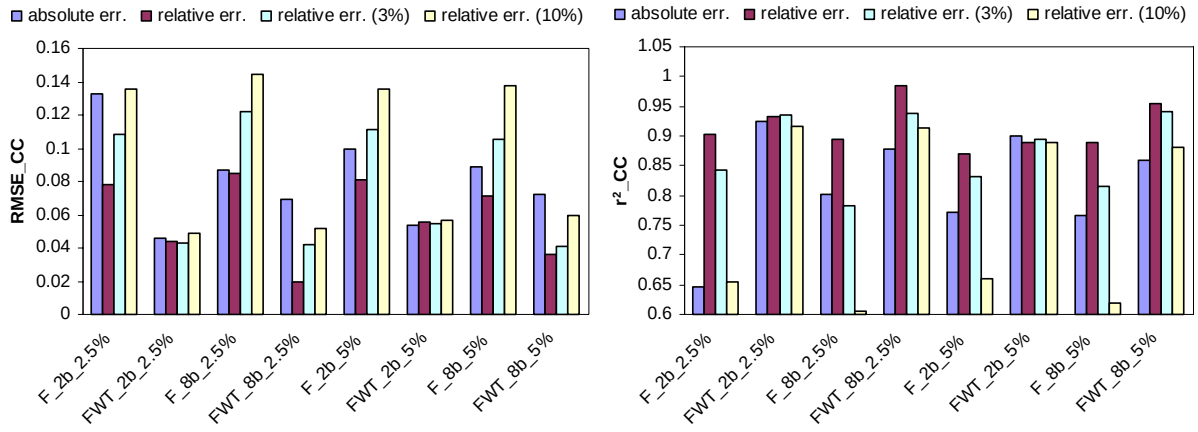


Figure IV-6: Comparaison entre les scénarios "F" et "FWT" de l'impact du schéma d'inversion (2b : 2 bandes et 8b : 8 bandes, 4 fonctions coût) sur les RMSE absolus et r^2 associés au LAI, u_f et CC calculés à partir d'un jeu de données synthétiques bruitées (bruit proportionnel fixé à 2.5 et 5%).

IV.5.3 Inversion des données AISA

Les données AISA ont été inversées en utilisant les huit bandes spectrales sélectionnées et la fonction coût "erreur relative". Le nombre de simplexes initiaux a été fixé à 5, avec un seuil d'arrêt de la procédure de recherche de minimum égal à 0.01. Deux paramètres sont laissés libres : LAI/u_f et CC.

La précision de l'inversion est évaluée pour les trois scénarios avec les sept fenêtres de moyennage, en comparant les LAI estimés et les 12 valeurs mesurées oscillant entre 4 et 5.8 $m^2.m^{-2}$. Les résultats sont résumés dans le *Tableau IV-3* en terme de RMSE (absolu et relatif) et de coefficient de corrélation r^2. Ils montrent que la taille de la fenêtre de moyennage optimale se situe entre 7 x 7 (2.8 x 2.8 m) et 11 x 11 (4.8 x 4.8 m). Pour les fenêtres 3 x 3 et 5 x 5, les LAI sont systématiquement surestimés, alors que pour les fenêtres 13 x 13 et 25 x 25, la procédure d'inversion donne des LAI relativement faibles et homogènes sans corrélation avec les mesures. Comparé au scénario "F", la prise en compte plus réaliste de l'architecture des houppiers et du T-R associé améliore nettement la précision de l'estimation du LAI, notamment avec les deux fenêtres 7 x 7/9 x 9 : 48.6/52 % pour FW et 50.7/57.5 % pour FWT. Toutefois, les niveaux de corrélation restent faibles : 0.36/0.41 (F), 0.49/0.37 (FW) et 0.53/0.41 (FWT).

Taille fenêtres	**F**			**FW**			**FWT**		
	RMSE ($m^2.m^{-2}$)	RMSE (%)	r^2	RMSE ($m^2.m^{-2}$)	RMSE (%)	r^2	RMSE ($m^2.m^{-2}$)	RMSE (%)	r^2
3 x 3	4.61	94.6	0.22	3	61.5	0.28	2.63	53.9	0.18
5 x 5	3.61	74.1	0.29	2.24	45.9	0.45	1.95	39.9	0.47
7 x 7	2.72	55.8	0.36	1.4	28.8	0.49	1.34	27.6	0.53
9 x 9	1.81	37.1	0.41	0.87	17.9	0.37	0.77	15.8	0.41
11 x 11	1.07	22	0.1	1.15	23.5	0.1	1.02	21	0.07
13 x 13	0.95	19.5	-	1.39	28.5	-	1.18	24.2	-
25 x 25	1.55	31.9	-	1.63	33.3	-	1.31	26.9	-

Tableau IV-3: RMSE absolus ($m^2.m^{-2}$), relatifs (%) et coefficients de corrélation (r^2) calculés entre les LAI estimés et mesurés.

La *Figure IV-7* présente la relation "LAI estimé - LAI mesuré" pour les trois scénarios et pour les fenêtres 7 x 7, 9 x 9 et 11 x 11. Elle montre clairement l'apport du scénario "FWT", en particulier par rapport au scénario "F". Avec une fenêtre de moyennage 9 x 9, la modélisation plus précise des scénarios "FW" et "FWT" permet d'estimer précisément 85% des LAI mesurés.

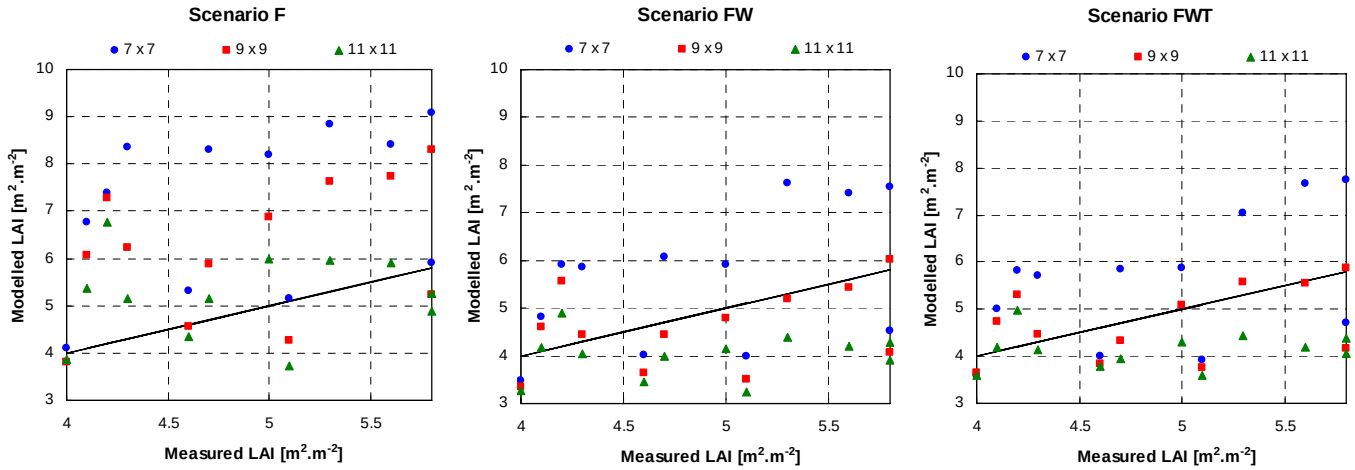


Figure IV-7: LAI simulé vs. LAI mesuré sur les 12 points de mesure pour les 3 scénarios : F, FW et FWT. 3 fenêtres de moyennage : 7x7 (●), 9x9 (■) et 11x11 (▲).

Le fait de laisser deux paramètres libres (LAI/u_f et CC) rend difficile l'extraction du LAI, car la procédure d'inversion doit aussi déterminer CC qui n'est pas aussi facilement accessible du fait de sa forte variabilité spatiale sur la zone de mesure et de la non unicité des relations "FRD-LAI". Cependant, il est possible de réduire les contraintes liées à ce paramètre en l'estimant à partir d'un seuillage radiométrique des images PIR. La valeur moyenne obtenue est 79 %. L'inversion effectuée en fixant CC à 79 % réduit considérablement le traitement de la zone de mesures : 1h sur un ITANIUM 2 cadencé à 1.66 GHz au lieu de 8h avec deux paramètres libres. Les résultats sont résumés dans le *Tableau IV-4*.

En fixant CC à 79 %, les RMSE_LAI sont diminués notamment pour les deux fenêtres 7 x 7/9 x 9 : 74.3/53.6 % (F), 25/0 % (FW) et 10.45/10.4 % "FWT". Cependant cette information *a priori* ne permet pas d'améliorer les niveaux de corrélation, excepté pour la fenêtre 7 x 7 des scénarios "F" et "FW" : r^2_LAI augmente respectivement de 0.36 à 0.5 pour "F" et de 0.49 à 0.54 pour "FW" (*Figure IV-8*).

Taille fenêtres	**F**			**FW**			**FWT**		
	RMSE ($m^2.m^{-2}$)	RMSE (%)	r^2	RMSE ($m^2.m^{-2}$)	RMSE (%)	r^2	RMSE ($m^2.m^{-2}$)	RMSE (%)	r^2
3 x 3	1.63	33.5	0.11	1.87	38.3	0.27	2.12	43.6	0.08
5 x 5	1.25	25.6	0.3	1.47	30.2	0.44	1.62	33.4	0.36

7 x 7	0.9	18.4	0.5	1.05	21.5	0.54	1.2	24.5	0.43
9 x 9	0.84	17.2	0.35	1.12	23	0.38	0.69	14.1	0.41
11 x 11	1.11	22.7	-	1.46	29.9	-	0.82	16.7	0.12
13 x 13	1.15	23.6	-	1.55	31.8	-	0.97	20	-
25 x 25	1.27	26	-	1.7	34.9	-	1.45	29.9	0.3

Tableau IV-4: RMSE absolus ($m^2.m^{-2}$), relatifs (%) et coefficients de corrélation (r^2) calculés entre les LAI estimés et mesurés. CC = 79%.

Il faut noter aussi que les LAI retrouvés par inversion des simulations du scénario "F" exhibent une tendance générale relevée par plusieurs auteurs (Gascon et al., 2004; Rautiainen, 2005; Schlerf & Atzberger, 2006): surestimation des faibles LAI et sous-estimation des forts LAI. Ce phénomène est le plus souvent expliqué par une non prise en compte du LAI du sous-bois. Étant donné la présence unique d'aiguilles sénescentes sous les arbres, ce dernier est négligeable sur la parcelle d'étude. Dans le cas du scénario "FWT", cette tendance n'est pas observée, du moins fortement atténuée pour les forts LAI. Ceci indiquerait que l'indice foliaire du sous-bois n'est pas seul responsable. En effet, la manière de simuler l'architecture et le transfert radiatif des houppiers denses joue aussi un rôle déterminant.

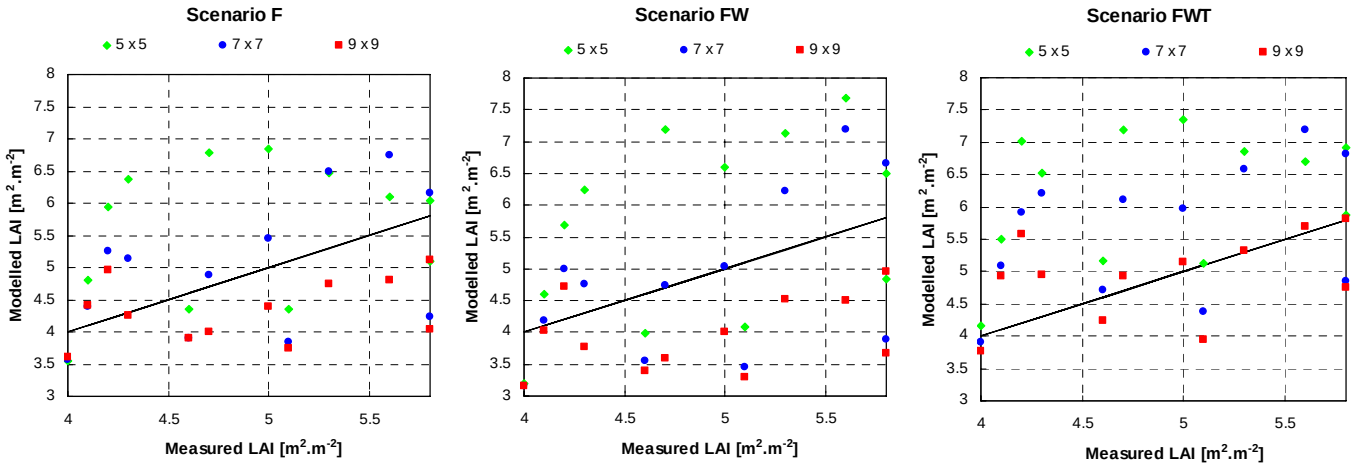


Figure IV-8: LAI simulé vs. LAI mesuré sur les 12 points de mesure pour les 3 scénarios : F, FW et FWT. 3 fenêtres de moyennage : 7x7 (●), 9x9 (■) et 11x11 (▲). CC = 79%.

Pour la fenêtre 9 x 9, la *Figure IV-9* montre que fixer CC à 79 % améliore surtout l'inversion du LAI du scénario "F", ce qui confirme la faible robustesse du processus d'inversion à deux paramètres libres pour ce scénario. Au contraire, l'inversion du LAI avec le scénario "FWT" est beaucoup plus stable, sur les 12 points de mesure. Dans ce cas, l'estimation des plus forts LAI (> 4.5 $m^2.m^{-2}$) est améliorée, alors que la précision des LAI plus faibles est dégradée.

Ces résultats mettent en évidence l'impact du CC sur l'inversion du LAI. Ainsi, ce paramètre devrait être fixé, non pas sur toute la zone de mesure, mais à chaque point de mesure, à l'échelle à laquelle le moyennage est réalisé.

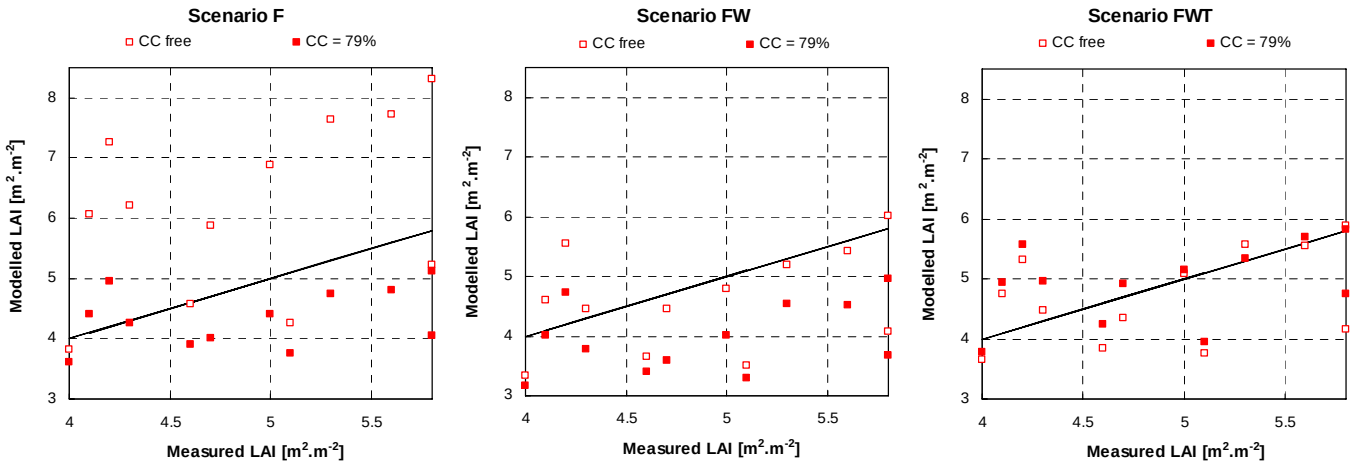


Figure IV-9: LAI simulé avec la fenêtre 9x9 vs. LAI mesuré sur les 12 points de mesure pour les 3 scénarios : F, FW et FWT. CC libre (□) et CC = 79% (■)

En outre, ces résultats montrent la difficulté d'obtenir des valeurs de LAI le plus proche des LAI mesurés pour l'ensemble des points de mesure. Il semble qu'il aurait été plus aisé de tester la procédure d'inversion sur la valeur moyenne issue d'un ensemble de mesures (*e.g.* 9 points du schéma de mesure VALERI) à plusieurs endroits de la parcelle. De plus, la mesure du CC aurait donnée une référence supplémentaire non négligeable au vu de son impact sur le processus d'inversion du LAI.

Le *Tableau IV-5* indique les valeurs moyennées sur la zone de mesures. Le scénario "FWT" avec CC fixé à 79% diminue l'erreur relative ε_r à moins de 1% de la valeur moyenne mesurée (*Figure IV-10*), alors que les scénarios "F" et "FW" exhibent des ε_r largement supérieures : 13% et 18%.

	F	**FW**	**FWT**
CC = libre	6.16	4.59	4.7
CC = 79%	4.27	3.97	4.92
Mesures Terrain	4.875	4.875	4.875

Tableau IV-5: LAI mesuré vs. LAI estimé pour les 3 scénarios. Valeurs moyennes sur la parcelle.

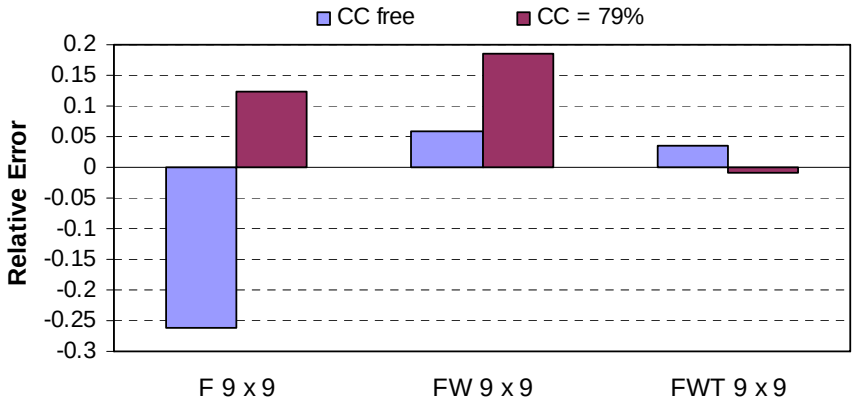


Figure IV-10: Erreur relative entre les valeurs moyennes obtenues sur toute la zone de mesure pour les 3 scénarios et la valeur moyenne mesurée.

IV.6 CONCLUSION PARTIELLE

Ce chapitre a permis de montrer le potentiel de la méthode d'inversion pour déterminer l'indice foliaire d'une parcelle de sapins de Norvège à partir d'images hyperspectrales THR. Les résultats ont mis en évidence la difficulté d'utiliser ce type de données, notamment en raison de la résolution spatiale extrêmement fine (40 cm) et de la sélection des bandes spectrales. Toutefois, les valeurs des LAI obtenus par inversion sont très proches des LAI mesurés, notamment pour les 85% du réseau de mesures. Ce travail souligne l'intérêt de bien prendre en compte l'architecture des houppiers et le T-R associé pour contraindre la solution de la procédure d'inversion, non pas de manière paramétrique (Meroni et al., 2004) ou statistique (Atzberger, 2005), mais plutôt en améliorant la modélisation physique du signal. En outre, le fait de tester l'inversion sur chaque point d'un réseau de mesures rend difficile la validation de la procédure. La comparaison des valeurs moyennes issues d'un réseau de plus petite taille (*e.g.* 9 points du schéma VALERI) à plusieurs endroits de la parcelle, aurait permis de diminuer considérablement les erreurs. Le travail de validation aurait aussi été facilité s'il avait été considéré un site d'études comportant des parcelles avec des LAI relativement homogènes.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

L'objectif de mon travail était d'améliorer le modèle DART (brevet PCT/FR 02/01181), au niveau de la modélisation des paysages terrestres et du transfert radiatif (T-R) associé, pour obtenir un modèle qui simule de manière précise des images multispectrales de télédétection optique (de l'ultraviolet à l'infrarouge lointain) de tout paysage terrestre naturel ou urbain, avec ou sans relief, pour toute atmosphère, pour toute altitude et toute résolution spatiale des capteurs spatiaux/aéroportés actuels (*i.e.* > 10 cm). Cet objectif a été atteint. Ainsi, le modèle DART fournit deux produits majeurs :

- Images de télédétection de paysages 3-D : simulation dans le plan du capteur, à toute altitude, du bas (avion) au sommet (satellite) de l'atmosphère, pour toute configuration expérimentale. Ainsi, l'aire des paysages étudiés peut être $5m^2$ ou $100km^2$. DART est donc un outil très utile pour concevoir de nouveaux capteurs (caractéristiques spectrales, *etc.*) et pour améliorer le traitement (inversion et classification) des images de télédétection.
- Bilan radiatif de paysages 3-D : distribution 3-D du rayonnement intercepté, absorbé et diffusé. Ce produit est très utile pour étudier le fonctionnement de la végétation et les flux d'énergie et de masse (CO2, H2O, *etc.*) à l'interface "Terre - Atmosphère".

Mon travail a amélioré les deux parties majeures du modèle DART, comme indiqué ci-dessous.

• Simulation du paysage

- *Paysage infini avec continuité du relief* : le paysage simulé peut être infini répétitif avec continuité du relief, ce qui permet de simuler des paysages avec des pentes régulières infinies. Auparavant, le paysage ne pouvait être qu'infini avec répétition du relief.
- *Simulation de grands paysages* : le paysage étudié peut être simulé à partir de cartes d'occupation du sol, pour ce qui est des paysages comprenant des parcelles agricoles, et/ou à partir de bases de données (format AutoCAD) pour ce qui est des paysages urbains.
- *Modélisation des couverts forestiers* : la modélisation des arbres est devenue beaucoup plus réaliste pour assurer une meilleure précision des mesures (réflectance et température de brillance) simulées du capteur. Pour cela, un arbre est désormais modélisé par un tronc, des branches, des brindilles et des éléments foliaires plus ou moins groupés, tout en prenant en compte la variabilité horizontale et verticale des éléments foliaires et ligneux.

• Modélisation du transfert radiatif

Les améliorations (rappelées ci-dessous) ont été apportées de manière à ce que le modèle DART ait la même précision que le modèle de référence DARTMC, basé sur une approche de *Monte Carlo.*

- *T-R dans les cellules mixtes et turbides multi-espèces* : l'amélioration de la modélisation des éléments ligneux a introduit des cellules "multi-espèces" pouvant contenir plusieurs éléments turbides (feuilles, brindilles) ainsi que des cellules "mixtes" pouvant contenir à la fois plusieurs éléments turbides et des éléments plans (troncs, branches). Ceci a impliqué de concevoir et implanter une modélisation du T-R (diffusion et émission thermique) spécifique.
- *Diffusion multiple dans les milieux turbides* : l'amélioration a surtout porté sur 3 points. 1) La diffusion volumique est calculée de manière plus précise, à partir d'une meilleure prise en compte de l'origine des rayons qui sont diffusés, et ce avec un niveau de précision réglable. Pour cela, il est utilisé la fonction $T(\Omega_{\text{secteur k}},\Omega_j)$, où k indique un secteur angulaire et j une des N_{dir} directions discrètes possibles, calculée à partir de la fonction de phase foliaire $T(\Omega_i,\Omega_j)$, où i et j indiquent une des N_{dir} directions discrètes possibles. 2) Meilleure précision du trajet des rayons, grâce à la prise en compte simultanée des points d'émission à l'intérieur des cellules "diffusantes", des points par lesquels les rayons diffusés sortent de ces cellules, et des trajets pré-calculés. 3) Meilleure précision du lieu où les rayons incidents sont interceptés. Pour cela, le lieu d'interception (*i.e.*, barycentre énergétique) est stocké pour chaque face de la cellule, et non plus uniquement pour l'ensemble de la cellule.
- *Émission thermique* : sa modélisation a été fortement améliorée. De manière à permettre des temps de calcul acceptables, la modélisation de l'émission thermique des cellules turbides repose sur le pré-calcul de l'émission de cellules turbides pour des valeurs de LAI discrètes, pour l'ensemble des espèces végétales présentes. De plus, le suivi de rayon utilise des points d'émission qui sont déterminés par direction d'émission et par face de cellule turbide. Ce calcul tient compte de l'hétérogénéité spatiale à la fois de la densité d'émission par face de cellule et de l'atténuation dans les éventuelles cellules turbides voisines. Les cellules *Air* ont une émission volumique isotrope selon la loi de Planck, pondérée par l'émissivité. L'émission est calculée "couche par couche" avec une direction qui passe par le centre de la cellule émettrice, et une origine dans le plan supérieur (direction montante) ou inférieur (direction descendante) qui borne cette cellule.
- *Modélisation multispectrale* : la modélisation du T-R est simulée simultanément dans plusieurs longueurs d'ondes sur tout le domaine optique. Cette amélioration réduit les temps de simulation en évitant de réitérer plusieurs fois les calculs des trajets des rayons associés aux différentes longueurs d'onde, comme lors de plusieurs simulations monospectrales.

Différentes études de sensibilité ont été réalisées avec succès pour tester la cohérence et la précision du modèle DART. Ainsi, l'impact du rapport "dimension verticale / dimension horizontale" des cellules s'est avéré très faible, à la fois au niveau de la simulation de la réflectance et de la température de brillance. D'autre part, l'augmentation du nombre de secteurs angulaires utilisés pour stocker l'anisotropie du rayonnement incident qui donne lieu à de la diffusion s'est bien avéré améliorer la précision des simulations DART. De plus, l'introduction des éléments ligneux augmente l'anisotropie du FRD et

diminue nettement les réflectances nadirs PIR, avec un impact plus marqué pour les houppiers éclairés que pour les houppiers à l'ombre. Les éléments ligneux se sont aussi avérés avoir un impact sur quatre indices de végétation/directionnel (NDVI, AVI, GEMI, HDS).

Le souci de tester la validité et l'intérêt des fonctionnalités et/ou améliorations apportées au modèle DART m'a conduit à participer à une inter comparaison de modèles dans l'expérience RAMI-3 lancée en 2005 (http://rami-benchmark.jrc.it/HTML/RAMI3/RAMI3.html) et à une comparaison avec des mesures du capteur hyperspectral aéroporté AISA d'un site forestier (Malenovsky, Martin *et al.*, 2006). La comparaison avec les mesures AISA a clairement mis en évidence que l'amélioration de la modélisation des arbres améliore nettement la modélisation de la réflectance des couverts forestiers. Cependant, des divergences subsistent entre les simulations DART et les mesures aéroportées, en particulier dans le domaine spectral du rouge. L'explication retenue est la forte contribution des algues vertes et lichens, non prise en compte dans le modèle. L'introduction de ces éléments bio-indicateurs pourrait déboucher sur des études très intéressantes, étant donné leur sensibilité à la pollution de l'air.

De manière logique, l'introduction des éléments ligneux dans la modélisation des arbres s'est avérée avoir un impact positif au niveau de l'inversion d'images de télédétection. Cet aspect a été évalué avec l'inversion d'images AISA à très haute résolution spatiale (THR) dans le but de déterminer l'indice foliaire (LAI). La méthode d'inversion a tout d'abord été adaptée à l'approche multispectrale puis améliorée pour extraire deux nouveaux paramètres foliaires (épaisseur équivalente en eau C_w et teneur en matière sèche C_m). Il est apparu que la prise en compte des éléments ligneux améliore nettement les estimations de LAI. Ces premiers résultats très encourageants doivent être complétés par de nouveaux travaux sur d'autres sites avec d'autres espèces d'arbres, d'autres mesures de télédétection, *etc.*

DART est désormais un modèle opérationnel tant au niveau du code informatique (> 100 000 lignes en langage C, C++, Java), que de sa précision et de ses fonctionnalités. Il est distribué (NASA, ESA, UNAM, Université de Wageningen, *etc.*) par l'Université Paul Sabatier, avec l'accord du CNES et du CNRS. DART est désormais un outil très utile pour l'axe de recherche majeur du CESBIO : "étude du fonctionnement et de la dynamique de la Biosphère continentale à différentes échelles spatiales et temporelles".

Le modèle DART bénéficie d'un soutien efficace du CNES dans le but de devenir un outil de référence pour les études en télédétection. Ainsi, dans ce cadre, la société Magellium a effectué un ré-engeneering du code source et de l'interface graphique (http://www.cesbio.ups-tlse.fr/fr/dart2.html) pour les environnements Linux et Windows. Durant mes travaux de thèse, j'ai participé à ce travail afin d'assurer le meilleur transfert de technologie possible. Sur le plan personnel, ce travail de collaboration m'a permis de me familiariser avec le milieu professionnel de la télédétection spatiale et de déboucher sur une proposition d'emploi dans la société Magellium. Mon travail futur dans cette société sera d'apporter au

modèle DART, en collaboration avec le CESBIO, les améliorations scientifiques, informatiques et fonctionnelles indiquées ci-dessous.

D'un point de vue informatique, les travaux (gestion des variables, robustesse et temps de calcul) en cours, réalisés avec divers outils d'optimisation (*i.e., Purify, Quantify, Valgrind*), seront poursuivis. Ceci est très important pour les algorithmes concernant le T-R atmosphérique et l'émission des cellules turbides. De plus, il est envisagé un travail de parallélisation des rayons, en collaboration avec l'IRIT (Institut de Recherche en Informatique). Ainsi, l'emploi de 6 processeurs permettrait de traiter simultanément les interactions au niveau de chaque face de toute cellule. Concernant la simulation des paysages urbains, le rendu des images pourrait être amélioré en modélisant de nouveaux éléments (fenêtres) et/ou en assignant aux éléments de la scène des textures plus ou moins réalistes.

D'un point de vue applicatif, plusieurs améliorations sont prévues à court et moyen terme :

- *Modélisation 3D de la basse atmosphère*. La capacité à simuler les propriétés optiques 3D de la basse atmosphère sera implantée en raison de son utilité pour les paysages avec relief et/ou urbains.
- *Inversion de DART*. Il s'agira de "professionnaliser" la méthode d'inversion déjà développée dans le cadre de cette thèse, à la fois au niveau de la méthode d'inversion elle-même et des outils associés.
- *Couplage de DART avec un modèle d'évolution du paysage*. Ceci permettrait d'obtenir un modèle dynamique de simulation du FRD et de la température de brillance.
- *Amélioration et professionnalisation du modèle DARTEB de bilan d'énergie*. DARTEB (Belot, 2006) simule la distribution 3D des températures, ce qui est essentiel pour les simulations en mode (T).
- *Amélioration de la modélisation des couverts végétaux*. Elle s'appuiera sur des méthodes déjà implantées ou de nouvelles méthodes telles que l'interfaçage avec un modèle de croissance des plantes (*e.g.* AMAP). La nouvelle version du modèle PROSPECT (Bousquet *et al.*, 2005) qui simule l'anisotropie des propriétés optiques foliaires pourrait être intégrée.
- *Modélisation de l'émission de fluorescence*. L'intérêt actuel de la fluorescence pour étudier depuis l'espace l'état physiologique de la végétation explique la récente sélection du projet de mission spatiale FLEX (Fluorescence Explorer) par l'Agence Spatiale Européenne (ESA). La modélisation de la fluorescence sera obtenue en couplant DART à un modèle de fluorescence foliaire.
- *Modélisation des mesures d'altimétrie laser*. L'altimétrie laser est très prometteuse pour restituer la topographie du sol et la structure 3D du couvert végétal (hauteur, biomasse, taux de couvert, *etc.*). Pour cela, tout rayon sera caractérisé par une grandeur "temps" (*i.e.* trajet parcouru) additionnelle, sachant que le rayonnement incident sera confiné à une surface correspondant à la tache du laser.
- *Modélisation 3D de la moyenne atmosphère*. La prise en compte de la nature 3D de l'atmosphère permet en particulier de simuler les nuages. Son implantation implique l'abandon de la méthode de simulation actuelle basée sur l'emploi de fonctions de transfert.

Oliveraie (100 ha) située sur le site Agdal (Marrakech, Maroc), simulée dans le cadre du projet de recherches franco-marocain "Sud-Med". Compositions colorées d'images *Ikonos* (Bleu : 450-520nm; Vert : 520-600nm; Rouge : 630-690nm; PIR : 760-900nm; Panchromatique : 445-900nm; Δs : 2.44/0.61m; *Figure A*) et d'images DART (*Figure B*).

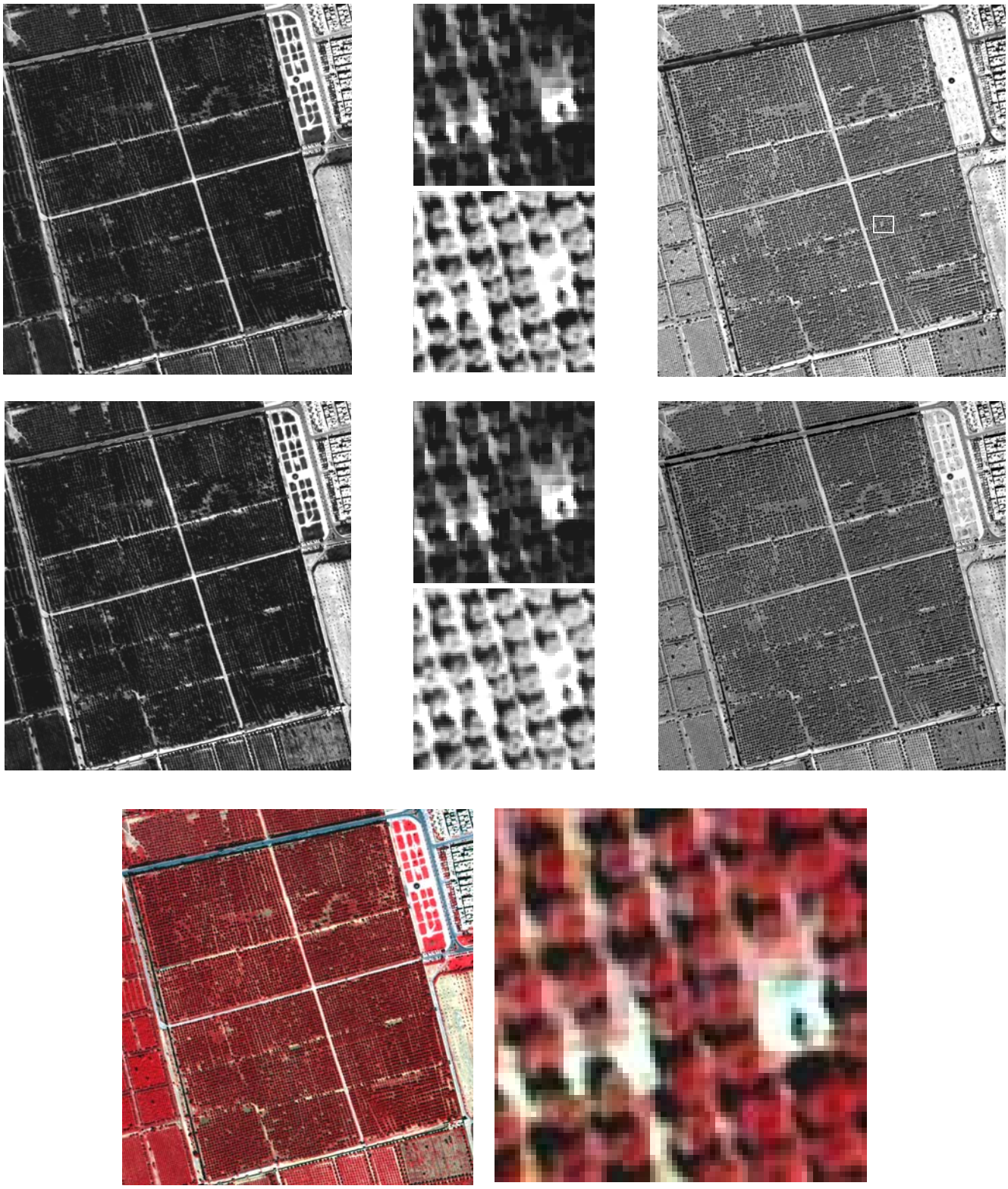


Figure A: Images Quickbird (V, R, PIR, Panchromatique) et compositions colorées.

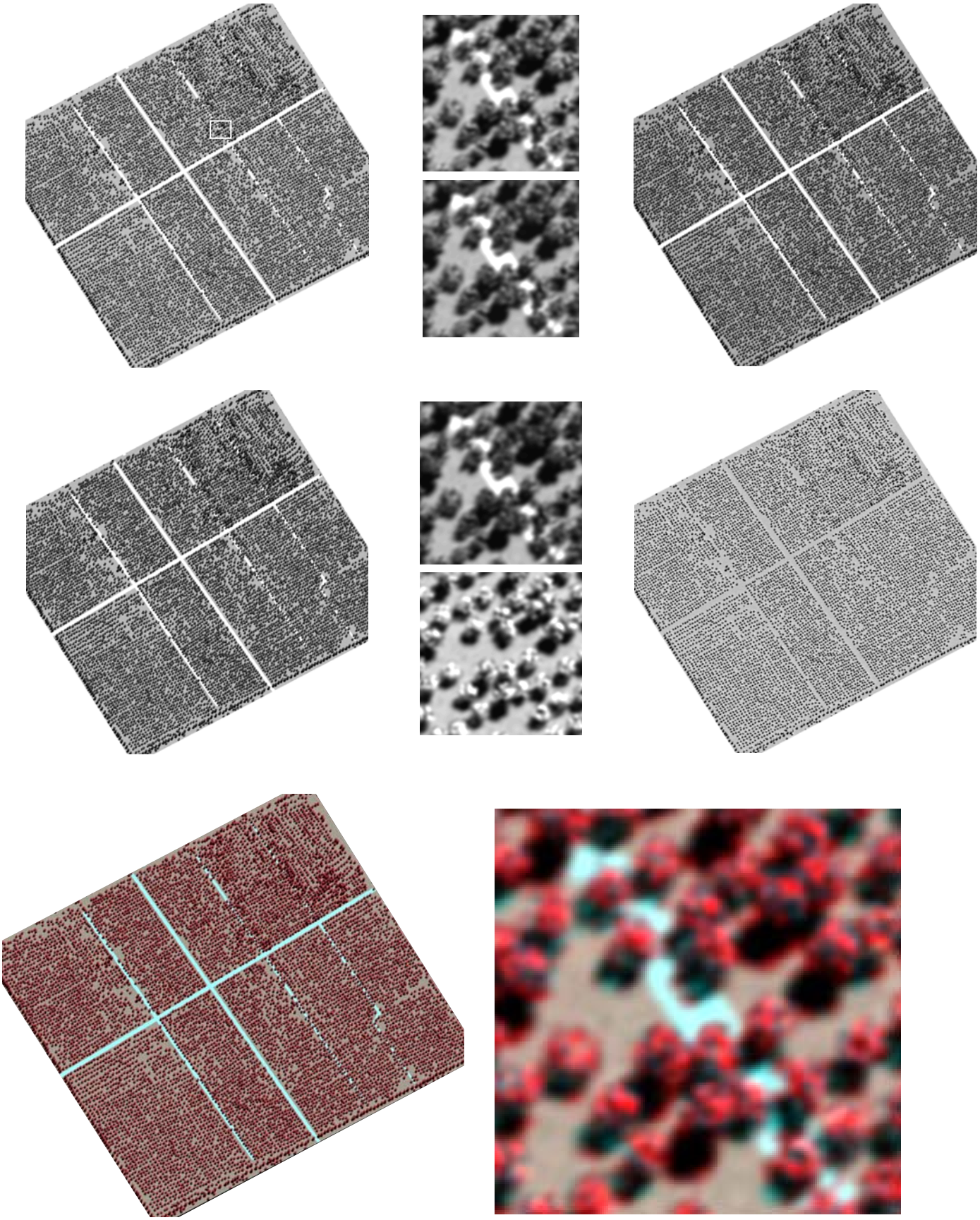


Figure B: Simulations DART obliques (B, V, R, PIR) et compositions colorées. Δx=Δy=Δz=1m. Dx=955m, Dy=888m, Dz=12m. 8554 oliviers + 428 autres arbustes.

Quartiers de Toulouse à partir de l'importation de fichiers AutoCAD (Mhamedi, 2005) de la base de données urbaine du service d'urbanisme de la Mairie de Toulouse : images DART obliques (*Figure C*) du quartier Bertier; Images DART du quartier Saint-Sernin (*Figure D* et *Figure E*).

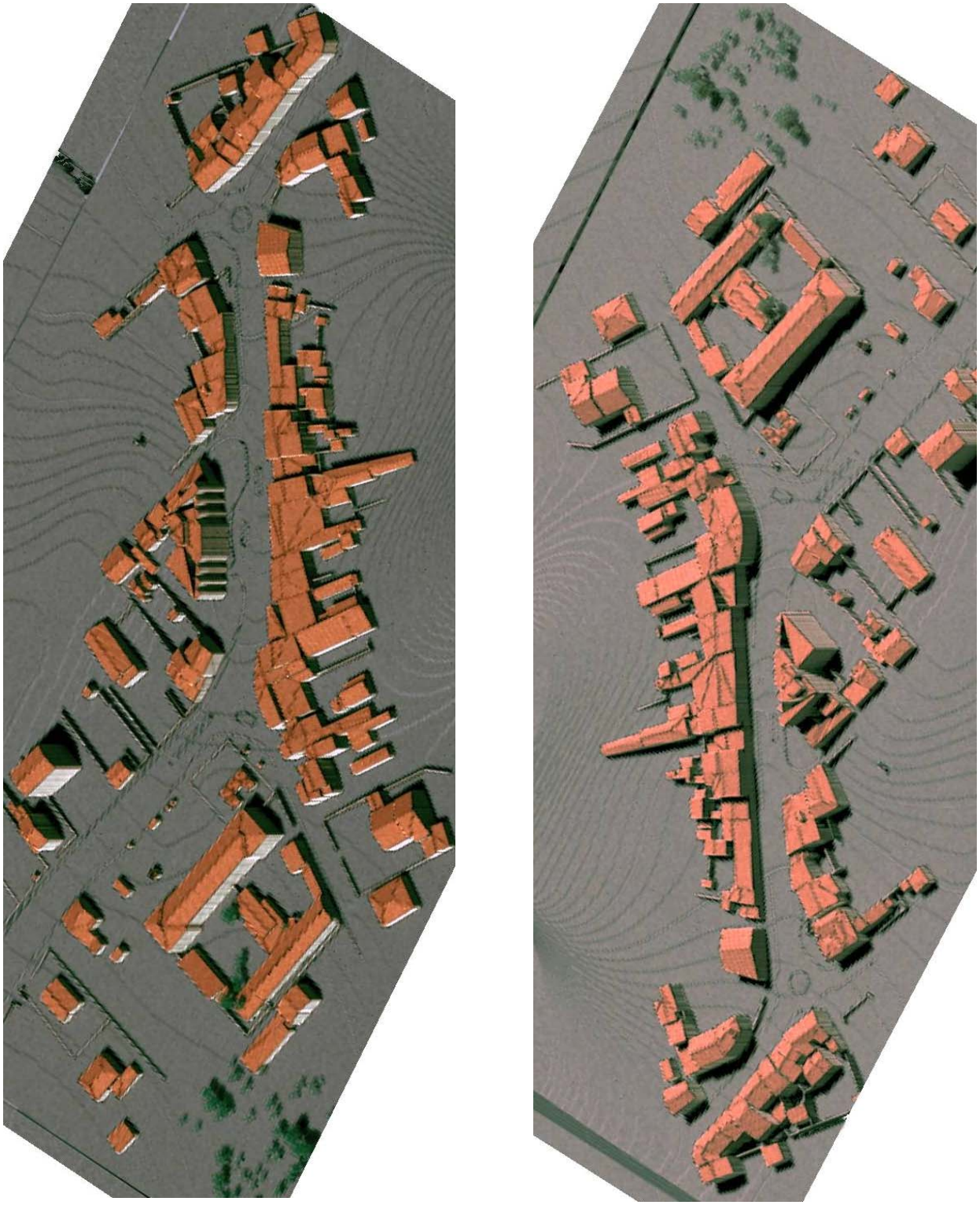


Figure C: Composition colorée (B, V, R) du quartier Bertier à Toulouse simulé à 1m de résolution et sur échantillonné à 0.25m. Vue oblique. Dx=380m, Dy=250m, Dz=33m. T_{calc}= 1h40 (1 bande) sur un itanium2 (64 bits) cadencé à 1.66GHz.



Figure D: Image nadir du quartier Saint-Sernin (Toulouse), simulé dans le bleu à 1m de résolution. Dx=1175m, Dy=915m, Dz=84m.

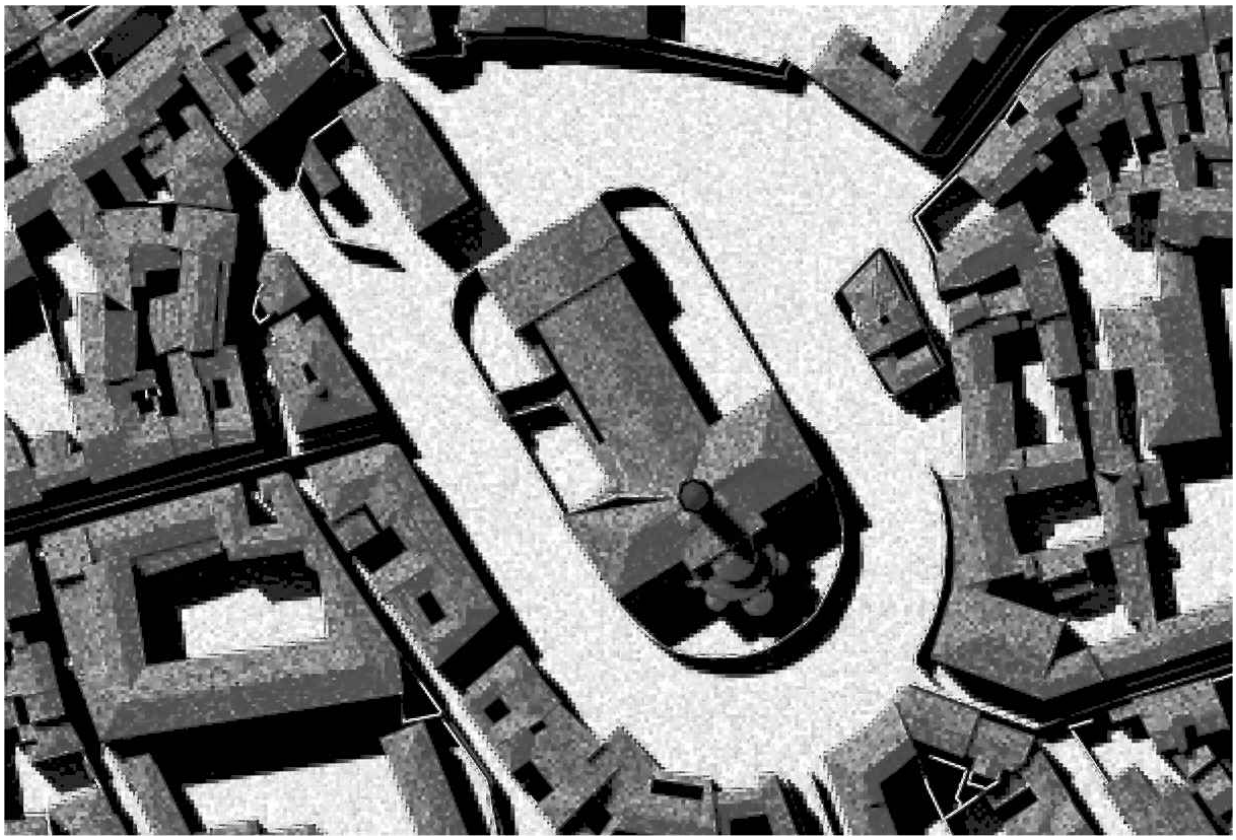


Figure E: Zoom sur la basilique Saint-Sernin.

Simulation DART à partir d'une carte d'occupation du sol (*Figure F*).

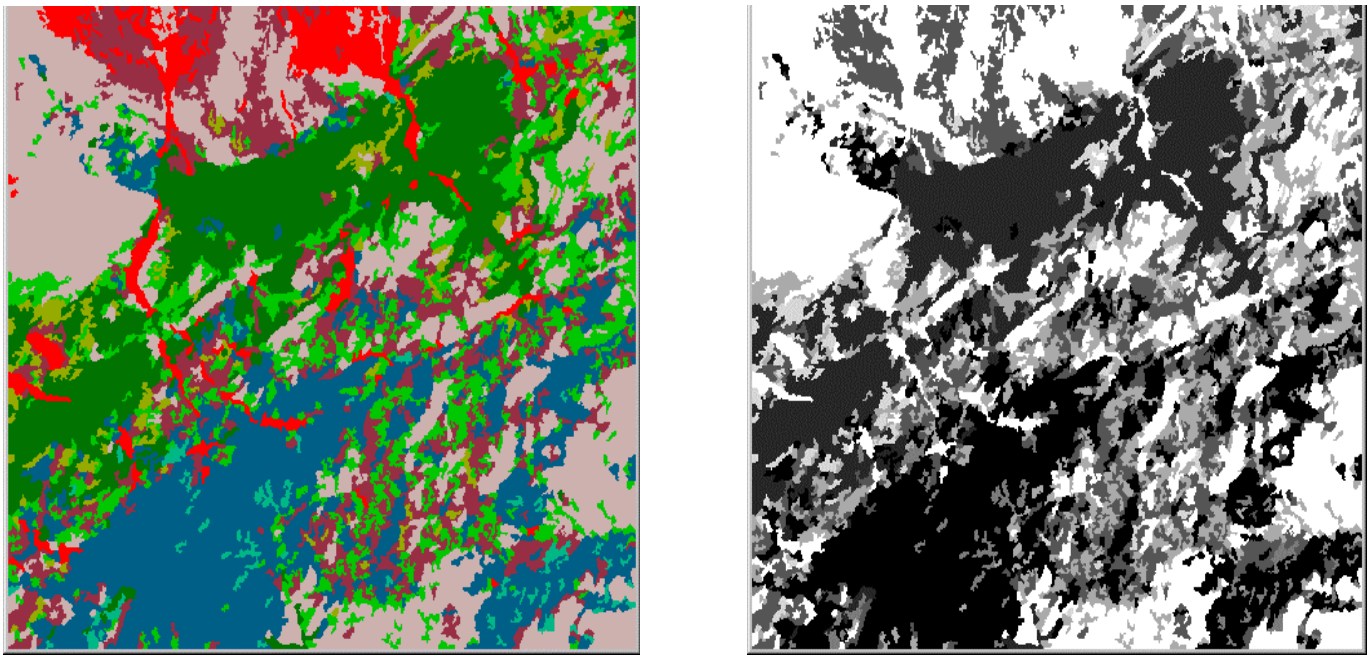


Figure F: Carte d'occupation du sol (Maroc, 48 x 44 km) et simulation DART associée (droite).

"Il est vrai que notre savoir est plus menu qu'un grain de sable au bord des lèvres de la mer. Il est aussi incontesté que certains vivants aériens sont plus instruits que nous le sommes, quoiqu'ils ne sachent faire la soupe à l'œuf."

Henri Gougaud,
Le rire de l'ange

BIBLIOGRAPHIE

Ader, G., (2003). Modélisation DART à partir d'une image SPOT. *Projet de fin d'études*, École Polytechnique de l'Université de Nantes, France, 62p.

Ahl, D. E., Gower, S. T., Mackay, D. S., Burrows, S. N., Norman, J. M., & Diak, G. R. **(2004)**. Heterogeneity of light use efficiency in a northern Wisconsin forest: implications for modeling net primary production with remote sensing. *Remote Sens. Environ.*, 93: 168-178.

Arora, V., (2002). Modeling vegetation as a dynamic component in soil-vegetation-atmosphere transfer schemes and hydrological models. *Rev. Geophys.*, 40(2), 1006, doi:10.1029/2001RG000103.

Atzberger, C. (2004). Object-based retrieval of biophysical canopy variables using artificial neural nets and radiative transfer models. *Remote Sens. Environ.*, 93: 53-67.

Andrieu, B., Baret, F., Jacquemoud, S., Malthus, T., and M. Steven, **(1997)**. Evaluation of an Improved Version of SAIL Model for simulating Bidirectional Reflectance of Sugar Beet Canopies. *Remote Sens. Environ.,* 60: 247-257.

Bacour, C., Jacquemoud, S., Vogt, P., Hosgood, B., Andreoli, G., Frangi, J-P., **(2001)**. Optimal sampling configurations for the estimation of canopy properties from BRDF data acquired with the EGO/JRC. *Proc. 8th International Symposium Physical Measurements & Signatures in Remote Sensing*, Aussois, France, 8-12 January 2001, CNES: 481-486.

Bacour, C., Jacquemoud, S, Tourbier, Y., Dechambre, M., Frangi, J.-P., **(2002)**. Design and analysis of numerical experiments to compare four canopy reflectance models. *Remote Sens. Environ.*, 79: 72-83.

Bannari, A., Morin, D., Bonn, F., & Huete, A. R. **(1995)**. A review of vegetation indices. *Remote Sens. Rev.*, 13, 95-120.

Belot, A., **(2002)**. Modélisation 3D des échanges d'énergie et de masse d'un couvert végétal. *Projet de fin d'études*, Institut National Agronomique Paris-Grignon, France, 41p.

Belot, A., Perrier, A. & J-P Gastellu-Etchegorry **(2006)**. DART-EB, a 3-D model of mass and energy transfers in vegetated canopy: Presentation and tests. Submitted to *Ecological Modelling*.

Benech, N., (2000). Modélisation des zones urbaines et forestières et simulation d'images haute résolution dans le cadre du développement du logiciel DART. *Projet de fin d'études*, Université de Bordeaux, France, 41p.

Bernat, V., **(2005)**. Améloration du projet DART. *Projet de fin d'études*, Université de Bordeaux, France, 50p.

Berk, A., Bernstein, L. S. & Robertson, D. C. **(1989)**. MODTRAN : A Moderate Resolution Model for LOWTRAN 7, GL-TR-89-0122, *Geophys. Lab.*, Bedford, MA, USA, 38p.

Bicheron, P. & Leroy, M., **(1999)**. A Method of Biophysical Parameter Retrieval at Global Scale by Inversion of a Vegetation Reflectance Model. *Remote Sens. Environ.*, 67: 251-266.

Bousquet, L., Lachérade, S., Jacquemoud, S. & Moya, I. **(2005)**. Leaf BRDF measurements and model for specular and diffuse components differentiation. *Remote Sens. Environ.*, 98: 201-211.

Boyat, P., (2001). Modélisation du transfert radiatif dans le domaine thermique des surfaces terrestres. *Projet de fin d'études*, École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Constructions Aéronautiques, Toulouse, France, 66p.

Bréon, F.-M., Vanderbilt, V., Leroy, M., Bicheron, P., Walthall, C.L., and E. Kalshoven, **(1997)**. Evidence of Hot Spot Directional Signature from Airbone POLDER Measurements. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 35 (2): 479-484.

Bréon, F.-M., Maignan, F., Leroy, M., Grant, I., **(2002)**. Analysis of Hot Spot Directional Signatures Measured from Space. *J. Geophys. Res.*, 107 (D16): 10.1029/2001JD001094.

Brown, L., Chen, J. M., Leblanc, S. G. and J. Cihlar **(2000)**. A Shortwave Infrared Modification to the Simple Ratio for LAI Retrieval in Boreal Forests: An Image and Model Analysis. *Remote Sens. Environ.*, 71: 16-25.

Bunnik, N.J.J., (1978). The Multispectral Reflectance of Shortwave Radiation of Agricultural Crops in Relation with their Morphological and Optical properties. *Thesis*, Agricultural University, Wageningen, The Netherlands, 175p.

Camacho-de Coca, F., Gilabert, M.A., and J. Meliá, **(2001)**. Hot Spot Signature dynamics in Vegetation Canopies with varying LAI. *Proc. 8th Int. Symp. on Physical Measurements & Signatures in Remote Sensing*, 8-12th January Aussois, France.

Camacho-de Coca, F., Leroy, M., Gastellu-Etchegorry, J.-P., and F.J. Garcia-Haro, **(2002)**. Measured Hot Spot Directional Signatures of Agricultural Crops during DAISEX'99 using POLDER data. *Proc. 1st Int. Symp. on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing*, 16-20th September, Valencia, Spain.

Campbell, G.S., (1990). Derivation of an angle density function for canopies with ellipsoidal leaf angle distributions**.** *Agric. For. Meteorol.*, 49:173-176.

Casa, R. & Jone, H. G. **(2005)**. LAI retrieval from multiangular image classification and inversion of a ray tracing model. *Remote Sens. Environ.,* 98: 414-428.

Chen, J.M. & Black, T. A. **(1991)**. Measuring leaf area index of plant canopies with branch architecture. *Agric. For. Meteorol.,* 57: 1-12.

Chen, J. M. & Black, T. A. **(1992)**. Defining leaf area index for non-flat leaves. *Plant, Cell & Environ.*, 15(4): 421-429.

Chen, J.M., Liu, J., Leblanc, S.G., Lacaze, R., Roujean, J.-L., **(2003).** Multi-angular optical remote sensing for assessing vegetation structure and carbon absorption. *Remote Sens. Environ.,* 84: 516-525.

Chourak, R., (2003). Inversion du modèle de Transfert Radiatif DART (Discrete Anisotropic Radiative Transfer). *Projet de fin d'études*, École Polytechnique de l'Université de Nantes, France, 52p.

Cierniewski, J., Baret, F., Verbrugghe, M., and S. Jacquemoud, **(1996).** Geometrical modelling of soil bidirectional reflectance incorporating specular effects. *Int. J. Remote Sens.*, 17(18): 3691-3704.

Cierniewski, J., Verbrugghe, M., **(1997)**. Influence of soil surface roughness on soil bidirectional reflectance. *Int. J. Remote Sens.*, 18(6): 1277-1288.

Cierniewski, J., (1999). Use of virtual surfaces for prediction of real rough soil surfaces brightness in any illumination and viewing conditions. *Joint workshop of ISPRS* "Sensors and Mapping from Space".

Clevers, J. G. P. W. (1988). Multispectral Aerial-Photography as a New Method in Agricultural Field Trial Analysis. *Int. J. Remote Sens.*, 9, 319-332.

Coleman, T.F., and Y. Li, **(1994)**. On the Convergence of Reflective Newton Methods for Large-Scale Nonlinear Minimization Subject to Bounds. *Mathematical Programming*, 67(2): 189-224.

Coleman, T.F., and Y. Li, **(1996)**. An Interior, Trust Region Approach for Nonlinear Minimization subject to Bounds. *SIAM Journal on Optimization*, 6: 418-445.

Collet, C., (2004). Vérification de la réciprocité de la réflectance par le logiciel DART. *Projet de fin d'études*, École Nationale Supérieure de Physique de Marseille, France, 52p.

Combal, B., Baret, F., Weiss, M., Trubuil, A., Mace, D., Pragnere, A., Myneni, R., Knyazikhin, Y., & Wang, L. **(2003)**. Retrieval of canopy biophysical variables from bidirectional reflectance: Using prior information to solve the ill-posed inverse problem. *Remote Sens. Environ.*, 84, 1-15.

Combes, P., Moya, I., Andlauer, J., Jacquemoud, S., Sinoquet, H., Varler-Grancher, C., **(2001)**. Un nouveau dispositif de mesure des propriétés optiques spectrales et bidirectionnelles de surfaces végétales. *Proc. 8th International Symposium on Physical Measurements & Signatures in Remote Sensing*, Aussois, France, 8-12 January 2001, CNES: 283-284.

Cornette, W.M., Acharya, P.K., Robertson, D.C. & Anderson, G.P. **(1994)**. Moderate spectral atmospheric radiance and transmittance code (MOSART). Rep. R-057-94(11-30), La Jolla, CA: Photon Research Associates, Inc.

Dallest, T., (2001). Modélisation du transfert radiatif atmosphérique dans le domaine de l'infrarouge thermique**.** *Projet de fin d'études*, École Nationale Supérieure d'Hydraulique et de Mécanique de Grenoble, France, 73p.

Danson, F. M., Winstanley, K. J. & A. M. Stocks **(1994)**. High-Spectral Resolution Indices For Forest Leaf Area Index. *Proceedings of the 6th Symposium on Physical Measurements and Spectral Signatures in Remote Sensing*, 17-21 January 1994, Toulouse, France: CNES, 239-244.

Daughtry, C. S. T., Biehl, L. L., & Ranson, K. J. **(1989)**. A new technique to measure the spectral properties of conifer needles. *Remote Sens. Environ.*, 27, 81-91.

Dauzou, V., (2001). Amélioration de la modélisation et la visualisation de maquettes informatiques 3-D. *Projet de fin d'études*, Université Michel de Montaigne, Bordeaux, France, 47p.

Deering, D.W., (1989). Field Measurements of Bidirectional Reflectance. *Theory and Applications of Optical Remote Sensing*. Edited by Ghassem Asrar (Wiley series in remote sensing): 14-65.

Demarez, V., (1997). Modélisation du transfert radiatif et télédétection hyperspectrale pour le suivi temporel de la teneur en chlorophylle d'une forêt tempérée. *Thèse*, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 154p.

Dennis, J.E., Jr., (1997). Nonlinear Least Squares, *State of the Art in Numerical Analysis*. Ed. D. Jacobs, Academic Press, 269-312.

Deschamps, P. Y., Bréon, F. M., Leroy, M., Podaire, A., Bricaud, A., Buriez, J. C. & Sèze, G. **(1994)**. The POLDER mission: instrument characteristics and scientic objectives. *IEEE Trans. Geosci Remote Sens.,* 32: 598-615.

Deschard, J., (2003). Implantation de la méthode de Monte Carlo dans le modèle D.A.R.T. (Discret Anisotropic Radiative Transfer). *Projet de fin d'études*, École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Constructions Aéronautiques, Toulouse, France, 63p.

Dhalluin, R., (2002). Vérification de la loi de Kirchoff par le logiciel DART (Discret Anisotropic Radiative Transfer). *Projet de fin d'études*, École Nationale Supérieure de Physique de Marseille, France, 104p.

Disney, M., Lewis, P., Saich, P., **(2006).** 3D modelling of forest canopy structure for remote sensing simulations in the optical and microwave domains. *Remote Sens. Environ.*, 100: 114-132.

Duthoit, S., **(2006)**. Thèse, Université Paul Sabatier, Toulouse, France.

Dzierzon, H., Sievanen, R., Kurth, W., Perttunen, J., & Sloboda, B. **(2003)**. Enhanced possibilities for analyzing tree structure as provided by an interface between different modelling systems. *Silva Fennica*, 37: 31-44.

Esteve, P., (1998). Inversion du modèle de transfert radiatif DART. *Thèse*, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 147p.

Fang, H., & Liang, S. **(2005)**. A hybrid inversion method for mapping leaf area index from MODIS data: Experiments and application to broadleaf and needleleaf canopies. *Remote Sens. Environ.*, 94: 405-424.

Fassnacht, K. S., Gower, S. T., MacKenzie, M. D., Nordheim, E. V., & Lillesand, T. M. **(1997)**. Estimating the leaf area index of North Central Wisconsin forests using the landsat thematic mapper. *Remote Sens. Environ.*, 61: 229-245.

Franklin, J., Michaelsen, J. & Strahler, A. H. **(1985)**. Spatial analysis of density dependent pattern in coniferous forest stands. *Vegetatio.* vol. 64, p. 29-36.

Gascon, F., Gastellu-Etchegorry J.P., Lefèvre M.J., (**2001a)**. Radiative transfer Model for Silmulating Hight-Resolution Satellite Images. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens*. 39 (9): 1922-1926.

Gascon, F., (**2001b)**. *Modélisation* physique et traitement d'images de télédétection optiques. *Thèse*, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 169p.

Gascon, F., Gastellu-Etchegorry, J. P., Lefevre-Fonollosa, M. J., & Dufrene, E. **(2004)**. Retrieval of forest biophysical variables by inverting a 3-D radiative transfer model using high and very high resolution imagery. *Int. J. Remote Sens.*, 25: 5601-5616.

Gastellu-Etchegorry, J.P., Demarez, V., Pinel, V., Zagolski, F., (**1996a)**. Modeling Radiative Transfer in Heterogeneous 3-D Vegetation Canopies. *Remote Sens. Environ.*, 58: 131-156.

Gastellu-Etchegorry, J.P., Zagolski, F. and J. Romier (**1996b)**. A simple Anisotropic Reflectance Model for Homogeneous Multilayer Canopies. *Remote Sens. Environ.*, 57: 22-38.

Gastellu-Etchegorry J.P., Adragna F., Kerr Y., Lagouarde J.P., Leroy M et Le Toan T., **(1999a)**. Détermination des paramètres de surface à partir de mesures de télédétection. *VIII Journées scientifiques de l'AUF*, Lausanne.

Gastellu-Etchegorry, J.P., Guillevic, P., Zagolski, F., Demarez, V., Trichon, V., Deering, D., Leroy, M., (**1999b)**. Modeling BRF and radiation regime of tropical and boreal forests, Part I: BRF. *Remote Sens. Environ.*. 68: 281-316.

Gastellu-Etchegorry, J.P., (2000). Télédétection, Biosphère, Modélisation. *Recueil de cours*, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 480p.

Gastellu-Etchegorry, J.P., Gascon, F. and P. Estève **(2003)**. An interpolation procedure for generalizing a look-up table inversion method. *Remote Sens. Environ.,* 87: 55-71.

Gastellu-Etchegorry, J.P., Martin, E., Gascon, F., **(2004)**. DART: a 3D model for simulating satellite images and studying surface radiation budget. *Int. J. Remote Sens.*, 25(1): 73-96.

Gentine, P., (2002). Amélioration des images simulées par le logiciel DART. *Projet de fin d'études*, École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, Toulouse, France, 85p.

Gerard, F. F. & P. R. J. North **(1997)**. Analysing the Effect of Structural Variability and Canopy Gaps on Forest BRDF Using a Geometric-Optical Model. *Remote Sens. Environ.,* 62: 46-62.

Gobron, N., Pinty, B., Verstraete, M.M., and Y.M. Govaerts, **(1997a)**. A semi-discrete model for the scattering of light by vegetation. J. Geophys. Res. 102(D8): 9431-9446.

Gobron, N., Pinty, B. & M. M. Verstraete **(1997b)**. Theoretical Limits to the Estimation of the Leaf Area Index on the Basis of Visible and Near-Infrared Remote Sensing Data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.,* 35 (6): 1438-1445.

Govaerts, Y., & M.M. Verstraete, **(1998)**. Raytran: A Monte Carlo ray tracing model to compute light scattering in three-dimensional heterogeneous media. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 36(2):493-505.

Gower, S. T., Krankina, O., Olson, R. J., Apps, M., Linder, S., & Wang, C. **(2001)**. Net primary production and carbon allocation patterns of boreal forest ecosystems. *Ecological Applications*, 11, 1395-1411.

Gower, S. T. (2003). Patterns and mechanisms of the forest carbon cycle. *Annual Review of Environment and Resources*, 28, 169-204.

Gruber, F. (1994). Morphology of coniferous trees: possible effects of soil acidification on the morphology of Norway spruce and Silver fir. In D. L. Godbold, & A. Hüttermann (Ed.), *Effects of acid rain on forest processes* (pp. 265-324). New York: Wiley-Liss.

Guillevic, P., (1999). Modélisation des bilans radiatif et énergétique des couverts végétaux. *Thèse*, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 181p.

Guyot, G., (1997). Climatologie de l'environnement. De la plante aux écosystèmes. Masson, Paris, 505p.

Handbook, **(2006)**. http://www.cesbio.ups-tlse.fr/fr/dart2.htm

Haboudane, D., Miller, J. R., Tremblay, N., Zarco-Tejada, P. J., & Dextraze, L. **(2002)**. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sens. Environ.*, 81**:** 416-426.

Hapke, B., (1993). Theory of Reflectance and Emittance spectroscopy. *Cambridge University Press*, New York, 455p.

Hapke, B., DiMucci, D., Nelson, R., and W. Smythe, **(1996)**. The Cause of Hot Spot in Vegetation Canopies and Soils: Shadow-Hiding Versus Coherent Backscatter. *Remote Sens. Environ.*, 58: 63-68.

Helbert, J., Berthelot, B. & Soler, C., **(2004)**. HYEMALIS : Un simulateur d'images de paysages tridimensionnels complexes. *Rev. Franç. Photo. Télédétec.* 173/174, 27-35.

Hyman, A.H., & M.J. Barnsley, **(1997)**. On the potential for land cover mapping from multiple-view-angle (MVA) remotely-sensed images. *Int. J. Remote Sens.*, 18 (11): 2471-2475.

Hoffmann, W. A., & Jackson, R. B. **(2000)**. Vegetation-climate feedbacks in the conversion of tropical savanna to Grassland. *Journal of Climate*, 13, 1593-1602.

Homolova, L. (2005). Leaf Area Index estimation for Norway Spruce forest stand by means of radiative transfer modeling and imaging spectroscopy. *Thesis Report*, Wageningen university, The Netherlands.

Idso B., & De Wit, C. T. **(1970)**. Light relations in plant canopies. Appl. Opt., 9:177-184.

ILWIS, The Integrated Land and Water Information System**,** International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), 7500 AA Enschede, the Netherlands. http://www.itc.nl/ilwis/

Ishii, H., & McDowell, N. **(2002a)**. Age-related development of crown structure in coastal Douglas-fir trees. *Forest Ecology and Management*, 169, 257-270.

Ishii, H., Ford, E. D., Boscolo, M. E., Manriquez, A. C., Wilson, M. E., & Hinckley, T. M. **(2002b)**. Variation in specific needle area of old-growth Douglas-fir in relation to needle age, within-crown position and epicormic shoot production. *Tree Physiology*, 22, 31-40.

Jacquemoud, S. & Baret, F., **(1990)**. PROSPECT : A model of leaf optical properties spectra. *Remote Sens. Environ.*, 34: 75-91.

Jacquemoud, S., (1992a). Utilisation de la haute résolution spectrale pour l'étude des couverts végétaux : Développement d'un modèle de réflectance spectrale. *Thèse,* Univ. Paris VII, France, 92p.

Jacquemoud, S., Baret, F., and J.F. Hanocq, **(1992b)**. Modeling Spectral and Bidirectional Soil Reflectance. *Remote Sens. Environ.*, 41: 123-132.

Jacquemoud, S., Ustin, S. L., Verdebout, J., Schumuck, G., Andreoli, G. and Hosgood, B. **(1996)**. Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model. *Remote Sens. Environ.,* 56 (3), 194-202.

Jacquemoud, S., Frangi J.-P., Govaerts, Y., Ustin S.L., **(1997)**. Three-dimensional representation of leaf anatomy – Application of photon transport. *In Physical Measurements & Signatures in Remote Sensing* (G. Guyot & T. Phulpin, Eds), A.A. Balkema, Rotterdam: 295-302.

Jacquemoud, S., Bacour, C., Poilvé, H., Frangi, J.-P., **(1999)**. Inversion de modèles de transfert radiatif pour estimer les caractéristiques d'un couvert végétal à partir de données de télédétection dans le domaine optique. *Comptes rendus du Coll. Int. La télédétection optique et radar et la géomatique pour la gestion des problèmes environnementaux* (A. Bannari, Ed.), Ottawa, Canada, 10-12 mai 1999: 113-125.

Jacquemoud, S., Bacour, C., Poilvé, H., Frangi, J.-P., **(2000)**. Comparison of Four Radiative Transfer Models to Simulate Plant Canopies Reflectance: Direct and Inverse Mode. *Remote Sens. Environ. 74: 471-481.*

Jonckheere, I., Fleck, S., Nackaerts, K., Muys, B., Coppin, P., Weiss, M., & Baret, F. **(2004)**. Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agric. For. Meteorol.*, 121: 19-35.

Jordan, C. F. (1969). Deviation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, 50, 663-666.

Kernighan, B.W., & D.M. Ritchie, **(1992)**. Le langage C norme ANSI 2ème Edition. Masson - Paris & PRENTICE HALL International - London, 280p.

Kimes, D.S., & Kirchner, J.A., (**1982)**. Radiative transfer model for heterogeneous 3-D scenes, *Applied Opt.*, 21: 4119-4129.

Kimes, D.S., & P.J. Sellers, **(1985)**. Inferring hemispherical reflectance of the Earth's surface for global energy budgets from remotely sensed nadir or directional radiance values. *Remote Sens. Environ.*, 18:205-223.

Kimes, D.S., Knyazikhin, Y., Privette, J.L., Abuelgasim, A.A. & Gao F. **(2000)**. Inversion Methods for Physically-Based Models. *Remote Sensing Reviews*, 18: 381-439.

Kimes, D.S., Gastellu-Etchegorry J.P., Estève, P., **(2002)**. Recovery of forest canopy characteristics through inversion of a complex 3D model. *Remote Sens. Environ.*, 79: 320-328.

Knyazikhin, Y., Martonchik, J. V., Diner, D. J., Myneni, R. B., Verstraete, M., Pinty, B., & Gobron, N. **(1998)**. Estimation of vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from atmosphere-corrected MISR data. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 103: 32239-32256.

Koetz, B., Baret, F., Poilvé, H., & Hill, J. **(2005)**. Use of coupled canopy structure dynamic and radiative transfer models to estimate biophysical canopy characteristics. *Remote Sens. Environ.*, 95, 115-124.

Kucharik, C. J., Norman, J. M., & Gower, S. T. **(1998)**. Measurements of branch area and adjusting leaf area index indirect measurements. *Agric. For. Meteorol.*, 91: 69-88.

Kucharik, C. J., Norman, J. M., & Gower, S. T. **(1999)**. Characterization of radiation regimes in non-random forest canopies : Theory, measurements and simplified modeling approach. Tree *Phys.*, 19: 695-706.

Kucharik, C. J., Foley, J. A., Delire, C., Fisher, V. A., Coe, M. T., Lenters, J. D., Young-Molling, C., Ramankutty, N., Norman, J. M., & Gower, S. T. **(2000)**. Testing the performance of a Dynamic Global Ecosystem Model: Water balance, carbon balance, and vegetation structure. *Global Biogeochemical Cycles*, 14, 795-825.

Kuuluvainen, T., & Sprugel, D. G. **(1996)**. Examining age and altitude related variation in tree architecture and needle efficiency in Norway spruce using trend surface analysis. *Forest Ecology and Management*, 88, 237-247.

Kuusk, A., (1991). The Hot Spot Effect in Plant Canopy Reflectance. *Photon-Vegetation Interactions: Applications in Optical Remote Sensing and Plant Ecology*. R.B. Myneni and J. Ross Eds: 140-158.

Kuusk, A., **(1995a)**. A Fast, Invertible Canopy Reflectance Model. *Remote Sens. Environ.*, 51: 342-350.

Kuusk, A., **(1995b)**. A Markov chain model of canopy reflectance. *Agric. For. Meteorol.*, 76: 221-236.

Kuusk, A., & T. Nilson, **(2000)**. A Directional Multispectral Forest Reflectance Model. *Remote Sens. Environ.*, 72: 244-252.

Lacaze, R. & J.-L. Roujean **(2001)**. G-function and Hot Spot (GHOST) reflectance model. Application to multi-scale airborne POLDER measurements. *Remote Sens. Environ.,* 76: 67-80.

Lacaze, R. Chen, M.J., Roujean, J.-L. and S. G. Leblanc **(2002)**. Retrieval of vegetation clumping index using hot spot signatures measured by POLDER instrument. *Remote Sens. Environ.*, 79: 84-95.

Latry, C., Rougé, B., **(2002)**. Les yeux de lynx de Spot5. *La Recherche*, 359: 98-99. http://www.larecherche.fr

Leblanc, S. G., Bicheron, P., Chen, J. M., Leroy, M., & Cihlar, J. **(1999)**. Investigation of directional reflectance in boreal forests with an improved four-scale model and airborne POLDER data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 37: 1396-1414.

Lee, K.-S., Cohen, W. B., Kennedy, R. E., Maiersperger, T. K., & Gower, S. T. **(2004)**. Hyperspectral versus multispectral data for estimating leaf area index in four different biomes. *Remote Sens. Environ.*, 91: 508-520.

Lenoble, J. (1993). Atmospheric radiative transfer. Adarsh Deepack Publishing.

Leroy, M., **(2001)**. Deviation from reciprocity in bidirectionnal reflectance. *J. Geophysical Research*., 106(D11): 11,917-11,923.

Li, X. & Strahler, A.H. **(1992)**. Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of the discrete crown vegetation canopy: effect of crown shape and mutual shadowing. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 30: 276–291.

Li, X., Strahler, A.H. & Woodcock, C.E. **(1995)**. A hybrid geometric optical-radiative transfer approach for modeling albedo and directional reflectance of discontinuous canopies. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens*. 33: 466–480.

Liang, S., and J.R.G. Townshend, **(1996)**. A Modified Hapke Model for Soil Bidirectional Refectance. *Remote Sens. Environ*., 55: 1-10.

Malenovský, Z., **Martin, E.**, Homolová, L., Pokorný, R., Schaepman, M.E., Gastellu-Etchegorry, J.P., Zurita Milla, R., Clevers, Jan G.P.W and P. Cudlín **(2005)**. Influence of forest canopy structure simulated within the DART model on retrieval of spruce stand LAI. *Proc. 9th Int. Symp. Phys. Measurements.& Signatures in Remote Sens.*, 17-19th October, Beijing, China.

Malenovsky, Z., Martin, E., Homolova, L., Gastellu-Etchegorry, J.-P., Zurita-Milla, R., Schaepman, M. E., Pokorny, R., Clevers, J.G.P.W. and P. Cudlin **(2006)**. Influence of woody elements of a Norway Spruce canopy on nadir reflectance simulated by the DART model at very high spatial resolution. Accepted to *Remote Sens. Env.*

Martin, E., Gastellu-Etchegorry J.P., Gascon, F., Dhalluin. R., **(2003)**. Model Intercomparison for validating the 2003 DART model. *Proc. International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 21-25th July, Toulouse, France.

Martonchik, J.V., Bruegge, C.J., and A.H. Strahler, **(2000)**. A Review of Reflectance Nomenclature Used in Remote Sensing. *Remote Sens. Rev.*, 19: 9-20.

Mathiaud, V., (2000). *Modélisation Physique d'Images de Télédétection - Paysages naturels et Urbains.* Projet de fin d'études, École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, Toulouse, France, 55p.

Mayer, B & A. Kylling **(2001)**. Three-dimensional radiative transfer over inhomogeneous terrain, *IAMAS 2001 assembly*, 10-18th July, Innsbruck, Autriche.

Meroni, M., Colombo, R., Panigada, C. **(2004)**. Inversion of a radiative transfer model with hyperspectral observations for LAI mapping in poplar plantations. *Remote Sens. Environ.,* 92: 195-206.

Mesarch, M. A., Walter-Shea, E. A., Asner, G. P., Middleton, E. M., & Chan, S. S. **(1999)**. A revised measurement methodology for conifer needles spectral optical properties: Evaluating the influence of gaps between elements. *Remote Sens. Environ.*, 68: 177-192.

Mhamedi, C (2005). *Stage de fin d'études*. IUP ISI, Université Paul Sabatier, Toulouse, France.

Middleton, E. M., Walter-Shea, E. A., Mesarch, M. A., Chan, S. S., & Rusin, R. J. **(1997)**. Optical properties of Black spruce and Jack pine needles at BOREAS sites in Saskatchewan, Canada. *Canadian J. Remote Sens.*, 23: 109-119.

Miesch, C., **(1999)**. Quantification des effets de l'hétérogénéité et du relief du sol en télédétection : modélisation du signal en entrée du capteur. *Thèse*, École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, Toulouse, France.

Monteith, J. L., & Unsworth, M. H. **(1990)**. *Principles of Environmental Physics*. London: 2nd Ed. Edward Arnold, pp. 291

Myneni, R.B., Marshak, A., Knyazikhin, Y., & G. Asrar, **(1991)**. Discrete Ordinates Method for Photon Transport in Leaf Canopies. *Photon-Vegetation Interactions: Applications in Optical Remote Sensing and Plant Ecology*. R.B. Myneni and J. Ross Eds: 48-106.

Myneni, R. B., Asrar, G., Kanemasu, E.T., **(1989)**. The theory of photon transport in leaf canopies. *Theory and applications of optical remote sensing*, A. G Eds., Wiley, New-York: 167-265.

Myneni, R. B., Nemani, R. R., & Running, S. W. **(1997)**. Estimation of global leaf area index and absorbed par using radiative transfer models. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 35: 1380-1393.

Myneni, R. B., Hoffman, S., Knyazikhin, Y., Privette, J. L., Glassy, J., Tian, Y., Wang, Y., Song, X., Zhang, Y., Smith, G. R., Lotsch, A., Friedl, M., Morisette, J. T., Votava, P., Nemani, R. R., & Running, S. W. **(2002)**. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sens. Environ.*, 83: 214-231.

Nelder, J. A., & Mead, R. **(1965)**. A simplex method for function minimization. *Comput. J.*, 7: 308-313.

Nicolini, E., Chanson, B., & Bonne, F. **(2001)**. Stem growth and epicormic branch formation in understorey beech trees (Fagus sylvatica L.). *Annals of Botany*, 87, 737-750.

Nilson, T. (1971). A theoretical analysis of the frequency of gaps in plant stands. *Agric. Forest Meteo.* 8: 25-38.

North, P.R.J., (1996). Three-dimensional forest light interaction model using a Monte Carlo method. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 34(5): 946-956.

North, P. R. J. (2002). Estimation of fAPAR, LAI, and vegetation fractional cover from ATSR-2 imagery. *Remote Sens. Environ.*, 80: 114-121.

Oker-Blom, P., Lappi, J. & H. Smolander **(1991)**. Radiation Regime and Photosynthesis of Coniferous Stands. *Photon-Vegetation Interactions: Applications in Optical Remote Sensing and Plant Ecology*. R.B. Myneni and J. Ross Eds: 471-496.

Pinel, V., (1997). Apport de la modélisation du transfert radiatif pour l'étude des écosystèmes forestiers par télédétection. *Thèse*, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 278p.

Pinel, V. & Gastellu-Etchegorry, J.-P. (1998). Sensitivity of texture of high resolution images of forest to biophysical and acquisition parameters. *Remote Sens. Environ*., 65: 61-85.

Pinty, B., Verstraete, M.M., Dickinson, R.E., **(1989)**. A Physical Model for Predicting Bidirectional Reflectances over Bare Soil. *Remote Sens. Environ.*, 27: 273-288.

Pinty, B., Verstraete, M.M., **(1991a)**. Étude et extraction des propriétés de surface par télédétection spatiale dans les courtes longueurs d'onde. *Adv. Space Res.*, 11(3): 169-172.

Pinty, B., Verstraete, M.M., **(1991b)**. Extracting Information on Surface Properties From Bidirectional Reflectance Measurements. *J. Geophys. Res.*, 96(D2): 2865-2874.

Pinty, B. & M. M. Verstraete **(1992)**. GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetatio*, vol 101, 15-20.

Pinty, B., Verstraete, M.M., and N. Gobron, **(1998)**. The effect of soil anisotropy on the radiance field emerging from vegetation canopies. *Geophys. Res. Let.*, 25(6): 797-800.

Pinty, B., Gobron, N., Widlowski J.L., Gerstl S.A.W., Vertraete M.M., Antunes M., Bacour C., Gascon F., Gastellu-Etchegorry J.P., Jacquemoud, S., North P., Qin W., Thompson R., **(2001)**. Radiation transfer model intercomparison (RAMI) exercice. *J. Geophys. Res.*, 106, D11, 11937-11956.

Pinty, B., Widlowski, J.L., Taberner, M., Gobron, N., Verstraete, M. M., Disney, M., Gascon, F., Gastellu, J.P., Jiang L., Kuusk, A., Lewis, P., Li, X., Ni-Meister, W., Nilson, T., North, N., Qin, W., Su, L., Tang, S., Thompson, R., Verhoef, W., Wang, H., Wang, J., Yan, G., & H. Zang **(2004)**. Radiation transfer model intercomparison (RAMI) exercice – 2nd phase. *J. Geophys. Res.*, 109, D16, D06210.

Plummer, S. E., North, P. R. and S. A. Briggs **(1994)**. The Angular Vegetation Index: an atmospherically resistant index for the second along track scanning radiometer (ATSR-2). *Proc. of the 6th Symposium on Physical Measurements & Spectral Signatures in Remote Sensing CNES*, Toulouse, 717-722.

Pokorný, R. & Marek, M. V. **(2000)**. Test of accuracy of LAI estimation by LAI-2000 under artificially changed leaf to wood area proportions. *Biologia Plantarum*, 43, 537-544.

Press, W. H., Teukolsky, A.A., Vetterling, W.T., Flannery, B.P., **(1992)**. Numerical Recipes in C – The Art of Scientific Computing, 2nd Edition. *Cambride University Press*, 965p. http://www.nr.com/

Privette, J.L., Ranga, B.M., William, J.E., and B. Pinty, **(1997)**. Inversion of a soil bidirectional reflectance model for use with vegetation reflectance models. *J. Geophys. Res.*, 100(D12): 25,497-25,508.

Proisy, C., (1999). Apport des données radar à synthèse d'ouverture pour l'étude de la dynamique des écosystèmes forestiers. *Thèse*, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 182p.

Qi, J., Kerr, Y. & A. Chehbouni **(1994)**. External Factor Consideration in Vegetation Index Development. *Proceedings of the 6th Symposium on Physical Measurements and Spectral Signatures in Remote Sensing*, 17-21 January 1994, Toulouse, France: CNES, 723-730.

Qin, W., and N.S. Goel, **(2000)**. 3-D scene modeling of semidesert vegetation cover and its radiation regime. Remote Sens. Environ., 74(1): 145-162.

Rautiainen, M., Stenberg, P., Nilson, T. & A. Kuusk **(2004)**. The effect of crown shape on the reflectance of coniferous stands. *Remote Sens. Environ.*, 89, 41-52.

Rautiainen, M., **(2005)**. Retrieval of leaf area index for a coniferous forest by inverting a forest reflectance model. *Remote Sens. Environ.*, 99, 295-303.

Rautiainen, M. & P. Stenberg **(2005)**. Application of photon recollision probability in coniferous canopy reflectance model. *Remote Sens. Environ.*, 96, 98-107.

Remphrey, W. R., & Davidson, C. G. **(1992)**. Spatiotemporal Distribution of Epicormic Shoots and Their Architecture in Branches of Fraxinus-Pennsylvanica. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere*, 22, 336-340.

Richter, R., & Schlapfer, D. **(2002)**. Geo-atmospheric processing of airborne imaging spectrometry data. Part 2: atmospheric/topographic correction. *Int. J. Remote Sens.*, 23: 2631-2649.

Ross, J. (1981), The Radiation Regime and Architecture of Plants Stands. Boston: W. Junk.

Ross, J., and A. Marshak, **(1991)**. Monte Carlo Methods. *Photon-Vegetation Interactions: Applications in Optical Remote Sensing and Plant Ecology*. R.B. Myneni and J. Ross Eds: 443-465.

Roujean, J.-L., (2000). A Parametric Hot Spot Model for Optical Remote Sensing Applications. *Remote Sens. Environ.*, 71: 197-206.

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. **(1973)**. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *Third ERTS Symposium*, NASA SP-351 I, 309-317.

Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ.*, 8, 127-150.

Shabanov, N. V., Wang, Y., Buermann, W., Dong, J., Hoffman, S., Smith, G. R., Tian, Y., Knyazikhin, Y., & Myneni, R. B. **(2003)**. Effect of foliage spatial heterogeneity in the MODIS LAI and FPAR algorithm over broadleaf forests. *Remote Sens. Environ.*, 85: 410-423.

Shabanov, N. V., Huang, D., Yang, W., Tan, B., Knyazikhin, Y., Myneni, R. B., Ahl, D. E., Gower, S. T., Huete, A. R., Aragão, L. E. O. C., & Shimabukuro, Y. E. **(2005)**. Analysis and optimization of the MODIS leaf area index algorithm retrievals over broadleaf forests. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 43: 1855-1865.

Schaepman, M. E., Koetz, B., Schaepman-Strub, G., & Itten, K. I. **(2005)**. Spectrodirectional remote sensing for the improved estimation of biophysical and chemical variables: Two case studies. *Inter. J. Applied Earth Observ. Geoinfo.*, 6: 271-282.

Schlerf, M. & Atzberger C. **(2006)**. Inversion of a forest reflectance model to estimate structural canopy variables from hyperspectral remote sensing data. *Remote Sens. Environ.*, 100: 281-294.

Smith, G. M., & Milton, E. J. **(1999)**. The use of the empirical line method to calibrate remotely sensed data to reflectance. *Int. J. Remote Sens.*, 20: 2653-2662.

Smolander, S., & Stenberg, P. **(2003)**. A method to account for shoot scale clumping in coniferous canopy reflectance models. *Remote Sens. Environ.*, 88: 363-373.

Smolander, S., & Stenberg, P. **(2005)**. Simple parameterizations of the radiation budget of uniform broadleaved and coniferous canopies. *Remote Sens. Environ.*, 94: 355-363.

Strahler, A.H. & Jupp, D.L.B. **(1991)**. Geometric-Optical Modeling of forests as remotely-Sensed Scenes Composed of Three-Dimensional, Discrete Objects in *Photon-Vegetation Interactions: Applications in Optical Remote Sensing and Plant Ecology* (R.B. Myneni and J. Ross Eds.), Springer-Verlag, New York, pp. 415-439.

Taylor, G. E. J. (1998). Forest ecosystems and air pollution: the importance of multiple stress interaction on a regional and global scale. In J. C. Cech, B. W. Wilson, & D. B. Crosby (Ed.), *Multiple stress in ecosystems* (pp. 23-40). Boca Raton: Lewis Publishers.

Thompson, R.L., and N.S. Goel, **(1998)**. Two models for rapidly calculating bidirectional reflectance: Photon spread (ps) model and statistical photon spread (sps) model. *Remote Sens. Rev.*, 16: 157-207.

Tian, Y., Woodcock, C. E., Wang, Y., Privette, J. L., Shabanov, N. V., Zhou, L., Zhang, Y., Buermann, W., Dong, J., Veikkanen, B., Häme, T., Andersson, K., Ozdogan, M., Knyazikhin, Y., & Myneni, R. B. **(2002a)**. Multiscale analysis and validation of the MODIS LAI product I. Uncertainty assessment. *Remote Sens. Environ.*, 83, 414-430.

Tian, Y., Woodcock, C. E., Wang, Y., Privette, J. L., Shabanov, N. V., Zhou, L., Zhang, Y., Buermann, W., Dong, J., Veikkanen, B., Häme, T., Andersson, K., Ozdogan, M., Knyazikhin, Y., & Myneni, R. B. **(2002b)**. Multiscale analysis and validation of the MODIS LAI product II. Sampling strategy. *Remote Sens. Environ.*, 83: 431-441.

Turner, D. P., Cohen, W. B., Kennedy, R. E., Fassnacht, K. S., & Briggs, J. M. **(1999)**. Relationships between Leaf Area Index and Landsat TM Spectral Vegetation Indices across Three Temperate Zone Sites. *Remote Sens. Environ.*, 70: 52-68.

Turner, D. P., Ritts, W. D., Cohen, W. B., Gower, S. T., Zhao, M. S., Running, S. W., Wofsy, S. C., Urbanski, S., Dunn, A. L., & Munger, J. W. **(2003)**. Scaling Gross Primary Production (GPP) over boreal and deciduous forest landscapes in support of MODIS GPP product validation. *Remote Sens. Environ.*, 88: 256-270.

Turner, D. P., Ritts, W. D., Cohen, W. B., Maeirsperger, T. K., Gower, S. T., Kirschbaum, A. A., Running, S. W., Zhao, M. S., Wofsy, S. C., Dunn, A. L., Law, B. E., Campbell, J. L., Oechel, W. C., Kwon, H. J., Meyers, T. P., Small, E. E., Kurc, S. A., & Gamon, J. A. **(2005)**. Site-level evaluation of satellite-based global terrestrial gross primary production and net primary production monitoring. *Global Change Biology*, 11, 666-684.

Vanderbilt, V. C., Grant, L., and S.L. Ustin, **(1991)**. Polarization of Light by Vegetation. *Photon-Vegetation Interactions: Applications in Optical Remote Sensing and Plant Ecology*. R.B. Myneni and J. Ross Eds: 192-228.

Verhoef, W., (1984). Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modelling : the SAIL model. *Remote Sens. Environ.*, 16:125-141.

Verhoef, W., (1998). Theory of radiative transfer models applied in optical remote sensing of vegetation canopies. *Thesis*, Agricultural University, Wageningen, The Netherlands, 310p.

Vermote, E., Tanré, D., Deuze, L., Herman, N., & Morcrette, J.J. **(1996)**. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum (6S). *6S user's guide, version 2*. LOA, Lille, France, 214 pp.

Verstraete, M. M., Pinty, B. & R. B. Myneni (1996). Potential and Limitations of Information Extraction on the Terrestrial Biosphere from Satellite Remote Sensing. *Remote Sens. Environ.*, 58: 201-214.

Verstraete, M. M., Pinty, B. & Dickinson, R. E. **(1990)**. A physical model of the bidirectional reflectance vegetation canopies: 1. Theory, *J. Geophys. Res.* 95: 11,765-11,775.

Wassenaar, T., (**2001)**. Reconnaissance des états de surface du sol en milieu viticole méditerranéen par télédétection à très haute résoluation spatiale. *Thèse*, École Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, France, 205p.

Weiss, M., Baret, F., Ranga, B. M., Pragnère, A., Knyazikhin, Y. **(2000)**. Investigation of a model inversion technique to estimate canopy biophysical variables from spectral and directional reflectance data. *Agric. For. Meteorol.*, 20, 3-22.

Weiss, M. (2004). Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agric. For. Meteorol.*, 121, 37-53.

Widlowski, J.L., Pinty, B., Gobron, N., Verstraete, M.M., **(2001)**. Monitoring Boreal Forests Resources in Northern Europe. *Proc. IGARSS*, 2001, Sydney, Australia.

Widlowski, J.-L., Verstraete, M. M., Pinty, B., Gobron, N. **(2003)**. Allometric Relationships of Selected European Tree Species. Rep. EUR 20855 EN, Joint Res. Cent., Ispra, Italy.

Zeng, N., & Neelin, J. D. **(2000)**. The role of vegetation-climate interaction and interannual variability in shaping the African Savanna. *Journal of Climate*, 13, 2665-2670.

Zhang, L., Dawes, W. R., & Walker, G. R. **(2001)**. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*, 37, 701-708.