# Modélisation physique d'images de télédétection optique

Ferran Gascon

▶ **To cite this version:**

Ferran Gascon. Modélisation physique d'images de télédétection optique. Physique [physics]. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2001. Français. NNT : . tel-00009863

**HAL Id: tel-00009863**
**https://theses.hal.science/tel-00009863**

Submitted on 31 Jul 2005

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**THÈSE**

pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ TOULOUSE III**

Discipline : Signaux, Images et Acoustique

présentée et soutenue par

**Ferran GASCON**

# MODÉLISATION PHYSIQUE D'IMAGES DE TÉLÉDÉTECTION OPTIQUE

Directeurs de thèse :

| | |
|---|---|
| **M. Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry** | Professeur UPS, CESBIO, Toulouse |
| **Mme. Marie-Josée Lefèvre-Fonollosa** | Ingénieur CNES, Toulouse |

Soutenue le 20 décembre 2001 devant le jury composé de :

| | | |
|---|---|---|
| **M. Jean-Luc Deuzé** | Professeur USTL, LOA, Lille | Rapporteur |
| **M. Alain Perrier** | Professeur INA-PG, INRA, Paris | Rapporteur et Président |
| **M. Eric Dufrêne** | Chargé de Recherche CNRS, ESE, Orsay | Examinateur |
| **M. Jean-Claude Menaut** | Directeur de Recherche CNRS, CESBIO | Examinateur |
| **M. Hervé Poilvé** | Ingénieur ASTRIUM, Toulouse | Examinateur |

---

Préparée au CESBIO (Centre d'Études Spatiales de la BIOsphère)
18, avenue Édouard Belin 31401 Toulouse, France, UE

*"All is a mystery,*
*the universe is dancing."*

N. K. Sharma,  Varanasi, Inde

## *Remerciements*

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement mes deux directeurs de thèse. Jean-Philippe pour, entre autres, sa grande générosité, sa rigueur scientifique et son enthousiasme constant. Marie-Josée pour avoir guidé mes travaux avec un grand esprit d'ouverture et de décision. Grâce à eux, ces trois ans furent une magnifique et très enrichissante expérience.

Je remercie les personnes qui m'ont fait l'honneur de participer au jury de thèse : Jean-Luc Deuzé, Alain Perrier, Éric Dufrêne, Jean-Claude Menaut et Hervé Poilvé.

Je tiens aussi à remercier le personnel qui m'a accueilli au CESBIO. Nadia-Louise Manac'h, pour son aide infatigable et sympathique. Les informaticiens (Gabriel Giordano, Antoine Groussous et Patrick Tabeling) pour leurs conseils éclairés. Jordi Marty pour son aide pendant les campagnes de mesures et ses cours d'occitan. Les administrateurs (Monique Britz et Jean-Pierre Champagnac) pour leur réactivité face à mes départs en mission soudains. Cathérine Molacek pour l'aide bibliographique. Jean-Claude Menaut pour ses efforts dans la restructuration du laboratoire.

Parmi les personnes à qui je dois un grand merci figurent mes collègues d'équipe: Emmanuel, Pierre et Valérie. Ainsi que les nombreux stagiaires avec qui j'ai eu le plaisir de travailler: Hubert, Frédéric, Thierry, Vincent, Nathalie, Valérie, Sylvie, Rémi et Pierre.

I also would like to thank the NASA colleagues (Jeff Privette, Jim Collatz, Daniel Kimes and Eric Brown) for their support during my training period at Goddard.

De même, l'équipe du laboratoire "Écologie, Systématique et Évolution" dirigé par Eric Dufrêne pour l'acquisition des mesures terrain de la forêt de Fontainebleau.

Aussi, un grand merci à mes compagnons de cantine, de discussions métaphysiques et d'aventures diverses: Christophe, Armand, Guillem, Danielle et Roger. Et un merci renforcé pour Christophe qui m'a beaucoup aidé pour l'écriture de ce manuscrit.

Le CESBIO n'est pas seulement un lieu de travail, c'est aussi un lieu de vie et de rencontre, merci à : Muriel, Yann, Olivier, Anne, Nicolas, Lionel, Sébastien, Stéphanie, Géraldine, Malcolm, Jennifer, les footballeurs, les pelotaris, ...

Je ne pourrai pas oublier non plus les compagnons de l'été 2001, un été plein d'aventures partagées avec Mari Carmen, Liz, Mikaël, Émilie, Fernando *et al*.

J'adresse aussi toute ma gratitude à tous ceux qui m'ont soutenu en dehors du contexte professionnel....

A les truques del mandrucu (la Paula, l'Irene, l'Imma, l'Elena, la Marta i en Joan) per haver viscut tres anys molt intensos preparant el projecte Quilalí.

I, no faltaria més, una *special* dedicatòria a la patoleia del Bar Palau: en Wowa, en Fredi, l'Heca, en David Font, en David Barbosa, en Jordi Pi, en Marc, i a la patoleia ocasional també, la Cesca, l'Anna, la Txore, l'Eva, la Meri, l'Anna Ventós, la Lídia, la Maria, ...

À Bruno Scherrer pour, entre autres, ses remarques données lors de mes premières soutenances en Bretagne et m'avoir donné des conseils de "wineur".

A mis compañeros toulousinos (Paulino, Lourdes, Maria, Rafa, Alberto, Javier, Alexandra, Sophie, Lionel, Jérôme Tronc,...) por todas las cañas y excursiones compartidas durante estos tres años.

Al meu amic Edu Clemente per haver-me ajudat a despertar l'interés per la ciència tot fent innombrables teories (e.g. la teoria de la reintegració de la matèria).

Si quelqu'un m'a suivi et appuyé depuis le tout début de mon idée de faire un thèse, celui-là c'est Jérôme. Un grand merci !

À ma famille toulousaine (Pauline, Suzanne, Jacques, Rémi, Colline et Michel) pour son soutien et son aide pendant mon séjour dans la ville rose.

A la Memé, la Lain, els avis, padrins i la resta de família.

I finalment, un enorme merci per als meus pares i germanes, per haver-me donat gairebé tot el que sóc.

## *Résumé*

En télédétection optique, les modèles de transfert radiatif à l'intérieur du paysage terrestre et de l'atmosphère permettent de simuler et d'analyser la mesure radiométrique. Ces modèles, utilisés en mode "direct", reproduisent la mesure et aident à la spécification technique des futurs capteurs. De même, en mode "inverse", ils permettent d'estimer des paramètres de surface pour toute configuration d'observation et avec peu de mesures *in situ*. Actuellement, les principales limitations des modèles existants sont au niveau des hypothèses simplificatrices dans la représentation géométrique du paysage (spécialement pour la végétation). Ces simplifications affectent fortement les niveaux radiométriques et la texture des images à toute résolution spatiale. Ce-ci est particulièrement évident pour les images à très haute résolution spatiale (de l'ordre du mètre). Ainsi, il convient d'utiliser des modèles avec une représentation tridimensionnelle réaliste du paysage terrestre. L'objectif principal de cette thèse était d'améliorer la précision et la robustesse d'un modèle de transfert radiatif tridimensionnel (DART). Ce modèle simule la propagation du rayonnement avec les méthodes du suivi de rayons et des ordonnées discrètes à l'intérieur d'un milieu composé de cellules turbides (pour la végétation et l'air) et des cellules contenant des figures opaques (pour les murs, sol, troncs, etc.). La précision radiométrique a été améliorée avec l'introduction de nouvelles hypothèses simplificatrices concernant la modélisation du transfert radiatif appliquée aux cellules turbides et opaques. La robustesse a été fortement améliorée avec la modélisation intégrée du transfert radiatif atmosphérique et avec la possibilité de simuler tout type de paysage (naturel ou artificiel). DART a été validé en le comparant à d'autres modèles de transfert radiatif et des images aéroportées d'une zone urbaine. Le modèle a prouvé être efficient pour la spécification des caractéristiques techniques du futur capteur à très haute résolution spatiale de la constellation de satellites *Pléiades*. Finalement, DART a été appliqué pour l'estimation des paramètres biophysiques (indice foliaire, taux de couverture arborée et concentration en chlorophylle des feuilles) d'une forêt tempérée à partir d'images satellitaires SPOT (20 mètres de résolution) et *Ikonos* (résolution de l'ordre du mètre).



***Mots-clés:***

Transfert radiatif, modèle, télédétection, atmosphère, végétation, urbain, images, réfléctance, capteur, très haute résolution spatiale, inversion, paramètres biophysiques.

## *Abstract*

In optical remote sensing, radiative transfer models applied to Earth landscape and atmosphere allow one to simulate and analyze satellite measurements. Used in direct mode, these models are valuable tools for specifying technical characteristics of future satellite sensors. Used in inverse mode, they allow one to estimate surface parameters from satellite measurements acquired with any observation configuration and with few ground data. Presently, the major limitation of radiative transfer models comes from the strong simplifying hypotheses used to represent the geometry of landscapes (especially for vegetation). This constraint affects the radiometry and texture of remote sensing images at any spatial resolution. It is particularly evident for very high spatial resolution images. This stresses the interest of models that simulate images while using a realistic 3-D representation of Earth landscapes. The major objective of this thesis was to improve the accuracy and robustness of a 3D radiative transfer model called DART. The model simulates radiation propagation with ray tracing and discrete ordinate methods within a medium composed of turbid cells (for vegetation and air) and cells containing opaque figures (for walls, soil, trunks, etc.). The accuracy was improved with the introduction of new simplifying hypotheses concerning radiative transfer modeling applied to turbid and opaque cells. The robustness was greatly improved with the direct modeling of radiative transfer in the atmosphere and with the possibility to simulate any kind of landscapes (urban or natural). DART accuracy was validated comparing it to other radiative transfer models and to airborne images of an urban district. The model proved to be efficient because it was used to specify the technical characteristics of the future very high spatial resolution sensor of the satellite constellation *Pléiades*. DART was also applied to the estimation of biophysical parameters (foliar index, crown coverage and chlorophyll concentration) of a temperate forest using SPOT (20 meters resolution) and *Ikonos* (1 meter resolution) satellite images.



***Keywords :***

Radiative transfer, model, remote sensing, atmosphere, vegetation, urban area, images, reflectance, sensor, very high resolution, inversion, biophysical parameters.

# TABLE DES MATIÈRES

**Remerciements**

**Résumé**

**Abstract**

**TABLE DES MATIÈRES ..... 1**

**ACRONYMES ..... 3**

**GLOSSAIRE ..... 5**

**INTRODUCTION ..... 11**

**I DESCRIPTION GÉNÉRALE DU MODÈLE DART ..... 15**

**I.1 Généralités sur le transfert radiatif ..... 15**

**I.2 Maquette du paysage et de l'atmosphère ..... 18**

**I.3 Éléments du paysage ..... 20**

**I.4 Algorithme de simulation ..... 23**

**I.5 Produits du modèle ..... 30**

**I.6 Architecture informatique ..... 33**

**I.7 Conclusion ..... 38**

**II MODÉLISATION DU TRANSFERT RADIATIF DANS LE PAYSAGE ..... 41**

**II.1 Modélisation du transfert radiatif de la végétation ..... 41**

II.1.1 Caractéristiques des cellules de feuillage ..... 41
II.1.2 Mécanismes d'interaction onde-matière ..... 44
II.1.3 Paysages de référence pour les études d'amélioration ..... 49
II.1.4 Expérience d'intercomparaison de modèles RAMI ..... 51
II.1.5 Redéfinition de la position du barycentre énergétique ..... 52
II.1.6 Prise en compte de l'anisotropie du rayonnement diffus intercepté ..... 56
II.1.7 Modification du point d'émission du rayonnement diffusé ..... 61
II.1.8 Évaluation des améliorations apportées ..... 66

**II.2 Modélisation du transfert radiatif des surfaces opaques ..... 66**

II.2.1 Caractéristiques des figures opaques ..... 67
II.2.2 Mécanismes d'interaction onde-matière ..... 70
II.2.3 Test de validation ..... 73

**II.3 Conclusion ..... 80**

**III MODÉLISATION DU TRANSFERT RADIATIF DANS L'ATMOSPHÈRE .... 81**

**III.1 Propriétés optiques de l'atmosphère ..... 82**
III.1.1 Constituants de l'atmosphère .....83
III.1.2 Mécanismes d'interaction onde-matière dans l'atmosphère .....84
III.1.3 Modélisation d'un volume d'air.....86
**III.2 Modélisation de l'atmosphère dans DART..... 89**
III.2.1 Maquette de l'atmosphère.....89
III.2.2 Caractéristiques des cellules d'air .....91
III.2.3 Algorithme de simulation.....98
III.2.4 Produits liées à la simulation de l'atmosphère .....100
III.2.5 Le couplage paysage-atmosphère .....101
III.2.6 Tests de validation.....103
**III.3 Conclusion..... ..... ..... ..... ..... ..... ..... ..... ..... ..... ..... ..... .....109**

**IV EXTRACTION DE PARAMÈTRES BIOPHYSIQUES PAR INVERSION DU MODÈLE DART ..... 111**

**IV.1 Méthode d'inversion du modèle DART ..... 112**
IV.1.1 Généralités sur l'inversion de modèles de tranfert radiatif .....112
IV.1.2 Méthode initiale d'inversion .....113
IV.1.3 Améliorations pour l'extraction de nouveaux paramètres foliaires .....117
IV.1.4 Méthode d'inversion adaptée aux images à très haute résolution spatiale 118
**IV.2 Application pour la Forêt de Fontainebleau ..... 121**
IV.2.1 Forêt de Fontainebleau.....121
IV.2.2 Données utilisées .....122
IV.2.3 Inversion de DART avec les images SPOT .....124
IV.2.4 Inversion de DART avec les images Ikonos.....130
**IV.3 Conclusion..... ..... ..... ..... ..... ..... ..... .....132**

**CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....135**

**ANNEXES.....139**
A Liste de publications.....139
B Modèles de transfert radiatif. .....141
C Format de fichiers du modèle DART. .....147

**RÉFÉRENCES.....157**

# ACRONYMES

| | |
|---|---|
| BA | Basse Atmosphère |
| BOA | Bottom Of the Atmosphere |
| CC | Crown Coverage |
| 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 |
| DARTI | Discrete Anisotropic Radiative Transfer Interactive |
| DGA | Délégation Générale pour l'Armement |
| ESE | Écologie Systématique et Évolution |
| fAPAR | fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation |
| FOV | Field Of View |
| FRD | Facteur de Reflectance Directionnelle |
| HA | Haute Atmosphère |
| HE | Houppier Éclairé |
| HO | Houppier à l'Ombre |
| IGBP | International Geosphere-Biosphere Program |
| IHM | Interface Homme Machine |
| IRT | InfraRouge Thermique |
| LAD | Leaf Angular Distribution |
| LAI | Leaf Area Index |
| LUT | Look Up Table |
| MA | Moyenne Atmosphère |
| ME | Maximal Error |
| MNT | Modèle Numérique du Terrain |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
| ONF | Office National des Forêts |
| PIR | Proche InfraRouge |
| POLDER | POLarization and Directionality of Earth Reflectances |
| RAMI | RAdiation transfer Model Intercomparison |
| RI | Réponse Impulsionnelle |
| RMSE | Root Mean Square Error |
| SE | Sol/sous-bois Éclairé |
| SIG | Système d'Information Géographique |
| SO | Sol / sous-bois à l'Ombre |
| SPOT | Satellite Pour l'Observation de la Terre |
| THR | Très Haute Résolution Spatiale |
| TOA | Top Of the Atmosphere |
| UPS | Université Paul Sabatier |
| VIS | Visible |
| VM | Variation Moyenne |

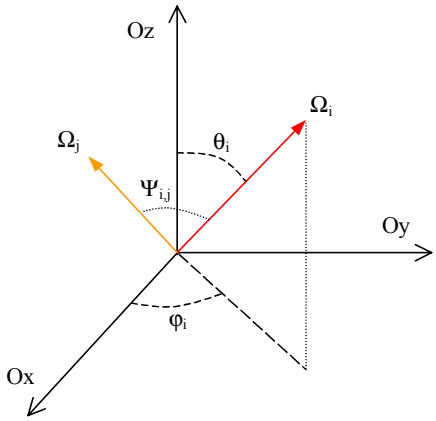
# GLOSSAIRE

Notations angulaires

**$\Omega_i$** Direction dans l'espace.

**$(\theta_i , \varphi_i)$** Angles zénithal et azimutal (système d'Euler) avec $\theta \in [0\ \pi]$ et $\varphi \in [0\ \ 2\pi]$.

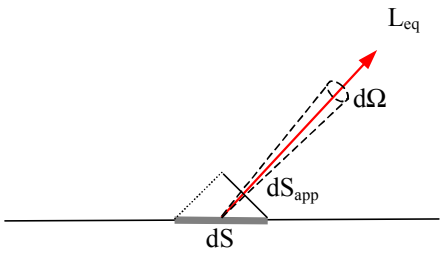
**$\psi_{ij}$** Angle entre deux directions $\Omega_i$ et $\Omega_j$ .




Définitions relatives à la réflexion

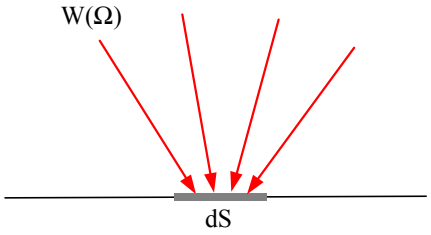
**Luminance énergétique (L) (W/m²/sr)**

Puissance du rayonnement quittant une source dans une direction donnée ($\Omega$), par unité d'angle solide ($d\Omega$) et par unité d'aire de surface apparente ($dS_{app}$) de la source dans cette direction.




**Éclairement (E) (W/m²)**

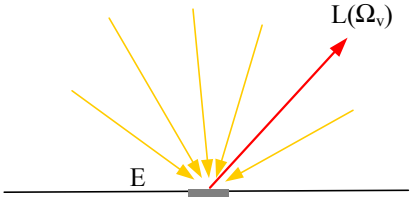
Puissance reçue par une surface unitaire (dS).



**Facteur de Réflectance Directionnelle (FRD ou ρ)**

Rapport de la luminance (L) réfléchie par une surface selon la direction $\Omega_v$ , à celle qui serait réfléchie ($L_{lamb}$) par un réflecteur diffusant parfait (surface blanche lambertienne) recevant le même éclairement. Puisque 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 de la capacité d'une surface à réfléchir l'énergie incidente. Toute surface a un facteur de réflectance directionnelle qui le caractérise. Ceci est fonction de la longueur d'onde, de la distribution directionnelle de l'éclairement incident et de la direction de visée.

**Albédo sphérique ($\rho_{h,h}$)**

Fraction du rayonnement incident réfléchi par une surface de vecteur normal Oz.

$$\rho_{h,h} = \textbf{Error!}$$

Glossaire général du modèle DART

| | |
|---|---|
| $\tau_p$ , $\tau_{p;}^{a}$ , $\tau_{p;}^{e}$ | Épaisseur optique totale, d'absorption et de diffusion des aérosols. |
| $\tau_m$ , $\tau_{m;}^{a}$ , $\tau_{m;}^{d}$ | Épaisseur optique totale, d'absorption et de diffusion des molécules. |
| $\Delta X_{HA}, \Delta Y_{HA}$ , $\Delta Z_{HA}$ | Dimensions des cellules de la haute atmosphère. |
| $\Delta X_{MA}, \Delta Y_{MA}$ , $\Delta Z_{MA}$ | Dimensions des cellules de la moyenne atmosphère. |
| $\alpha^a, \alpha_{m;}^{a}$ , $\alpha_{p;}^{a}$ | Coefficient d'extinction par absorption total, molécules et aérosols. |
| $\alpha^d, \alpha_{m;}^{d}$ , $\alpha_{p;}^{d}$ | Coefficient d'extinction par diffusion total, molécules et aérosols. |
| $\alpha^e, \alpha_{m;}^{e}$ , $\alpha_{p;}^{e}$ | Coefficient d'extinction total, molécules et aérosols. |
| $\omega_p$ | Albédo de diffusion des aérosols. |
| 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. |
| $<T(j,\Omega_s,\Omega_v)>_{\Omega_s}$ | Fonction de phase moyenne de la cellule de type j selon $\Omega_v$. |

| | |
|---|---|
| **$<T_i>$** | Transmittance moyenne à partir du centre d'une cellule i (*cf.* diffusions multiples). |
| **$\mu_n$, $\mu_s$, $\mu_v$** | Cosinus des angles zénithaux $\theta_n$, $\theta_s$ et $\theta_v$. |
| **$a_p$ , $g_{1p}$ , $g_{2p}$** | Paramètres de la fonction de phase des aérosols. |
| **$C_{ab}$** | Concentration en chlorophylle des feuilles. |
| **D(z)** | Densité de molécules de l'air (molécules.$m^{-3}$). |
| **$d_{arbre}$** | Diamètre moyen des houppiers des arbres |
| **$d_{H20}$** | (cm atm) Quantité de vapeur d'eau précipitable. |
| **$E_s(\Omega_s)$** | Constante solaire au niveau de la maquette. |
| **$f(j, \Omega_s \rightarrow \Omega_v, \Omega_f)$** | Fonction de diffusion totale des éléments foliaires de type j et de normale d'orientation ($\Omega_f$) selon une direction incidente ($\Omega_s$) et une direction de diffusion ($\Omega_v$). |
| **fAR** | Fraction de la puissance absorbée par une couche sur la puissance incidente sur la maquette. |
| **fIR** | Fraction de la puissance incidente sur une couche sur la puissance incidente sur la maquette. |
| | Flux solaire et atmosphérique incidents sur la maquette. |
| **$G(j, \Omega_n)$** | Facteur géométrique : Proportion de surface foliaire de type j perpendiculaire à la direction ($\Omega_n$). |
| **$G(j,\Omega_f)/2\pi$** | Fonction de distribution normalisée des normales des cellules de de feuillage de type j. |
| **$G_L$ , $G_F$** | Ensemble de paramètres libres et fixes. |
| **H** | Hauteur de la "maquette + couche fictive" (m) |
| **$h_{arbre}$** | hauteur moyenne des arbres. |
| **$H_p$, $H_m$** | 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.). |
| **LAD** | Distribution angulaire foliaire. |
| **LAI** | Indice foliaire ($m^2$ de feuillage par $m^2$ de sol). |
| **$M_s$** | "Point milieu", *i.e.* point origine du flux d'ordre 1 diffusé par une cellule "feuille". |
| **N** | Indice structural du modèle PROSPECT. |
| **n, N** | Indice et nombre total de rayons incidents sur une cellule. |

| | |
|---|---|
| **$n$, $N_{dir}$** | Indice et nombre total de directions discrètes de propagation: ($\Omega_n$, $\Delta\Omega_n$), $n \in [1, N_{dir}]$. |
| **$n_j$** | Indice de réfraction de la surface des éléments foliaires de type j. |
| **$P(r,\Omega',\Omega)/4\pi$** | Fonction de phase. |
| **$P(z)$** | (Pa) Pression atmosphérique. |
| **$P_{O_3}$** | (atm) Pression partielle de l'ozone. |
| **$s_{ATM}$** | 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. |
| **SKYL** | Rapport des éclairements atmosphérique et totaux incidents sur la maquette. |
| **$s_{MA}$** | Albédo sphérique de l'atmosphère avec la seule contribution de la moyenne atmosphère. |
| **$T_m;^a$** | Transmittance des gaz absorbants. |
| **$T(\Delta l,\Omega_n)$** | Transmittance selon $\Omega_n$ pour un trajet $\Delta l$. |
| **$T_1$, $T_2$** | 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 foliaire. |
| **$U_{H_2O}$** | ($g.cm^{-2}$) Masse d'eau, mesurée en grammes, 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 $\Omega_n$. |
| **$W_1(\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v)$** | 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. |
| **$W_{1,int}(\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v)$** | Flux $W_1(\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v)$ intercepté lors de la sortie d'une cellule i. |
| **$W_{BOA}(i,j,\Omega_n)$** | Rayonnement atmosphérique diffus en bas de l'atmosphère pour un pixel de coordonnées discrètes (i,j). |
| **$W_{BOA}(i,j,\Omega_s)$** | Rayonnement solaire direct en bas de l'atmosphère pour un pixel de coordonnées discrètes (i,j). |
| **$W_{diff}(i,\Omega_v)$** | Flux diffusé dans la direction ($\Omega_v$) par une cellule de type i. |
| **$W_{in}(0,\Omega_n)$** | Flux incident selon $\Omega_n$. |
| **$W_{int}(\Delta l_i,\Omega_n)$** | Flux intercepté selon $\Omega_n$ par une cellule i le long du trajet $\Delta l_i$ |

| | |
|---|---|
| $W_M(\Delta l_i,\Omega_s)$ | Diffusions multiples sortant d'une cellule i. |
| $W_{out}(z=H,\Omega_v)$ | Flux sortant de la maquette selon $\Omega_v$. |
| $W_s(z=H,\Omega_s)$, $W_a(z=H,\Omega_n)$ | |
| $W_{TOA}(i,j,\Omega_s)$ | Rayonnement solaire en haut de l'atmosphère descendant pour un pixel de coordonnées discrètes (i,j). |
| $W_{trans}(\Delta l_i,\Omega_n)$ | Flux transmis selon $\Omega_n$ par une cellule "feuille" i après un trajet $\Delta l_i$. |
| $W_{trans}(\Omega_n)$ | Flux transmis selon $\Omega_n$ par une cellule de type "tronc". |
| $\rho(z)$ | ($g.m^{-3}$) Masse volumique. |
| $\Delta l_i(\Omega_n)$ | Longueur de traversée d'un rayon à travers une cellule i selon la direction ($\Omega_n$). |
| $\Delta r_i(\Omega_n)$ | Distance entre le point d'entrée dans la cellule i et $M_s$ selon la direction ($\Omega_n$). |
| $\Delta s_i(\Omega_n)$ | Distance entre $M_s$ et le point de sortie dans la cellule i selon la direction ($\Omega_n$). |
| $\Delta x$, $\Delta y$, $\Delta z$ | Dimensions des cellules élémentaires suivant les axes (Ox), (Oy), (Oz). |
| $\Delta\Omega_n$, $\Delta\theta_n$, $\Delta\phi$ | Angle solide (sr), largeur zénithale (°) et largeur azimutale (°) de ($\Omega_n$). |
| $\Omega_s$ | Direction de l'éclairement solaire direct. |
| $\Omega_v$ | Direction de visée du capteur spatial ou aéroporté. |
| $\alpha(r,\Omega)$ | Coefficient d'extinction dans la direction ($\Omega$). |
| $\alpha(\Omega_s,\Omega_v,\delta s_i)$ | Coefficient d'extinction avec prise en compte de l'effet *hot-spot*, à une distance $\delta s_i$ du point milieu. |
| $\alpha_d(r,\Omega'\rightarrow\Omega)$ | Section efficace de diffusion différentielle au point r, pour un angle solide unité et selon ($\Omega$). |
| $\rho_{dj}$, $\tau_{dj}$ | Réflectance et transmittance hémisphériques des éléments foliaires de type j. |
| $\rho_{sol}$, $\rho_{tronc}$ | Réflectances hémisphériques des cellules de type "sol" et "tronc". |
| $\omega_j$, $\omega_{dj}$, $\omega_{sj}$ | Albédo moyen, de diffusion et spéculaire des éléments foliaires de type j. |

# INTRODUCTION

Dans des domaines divers, tels que l'écologie ou la cartographie, la télédétection optique est devenue une technique indispensable du fait de sa capacité à fournir des informations synoptiques à différentes échelles spatio-temporelles. L'analyse et la simulation des images de télédétection requièrent des outils capables de relier les mesures radiométriques aux caractéristiques du paysage terrestre et de l'atmosphère.

Dans le cadre de l'étude des échanges d'énergie et de masse (eau et dioxyde de carbone) entre la biosphère et l'atmosphère, l'analyse des images permet d'estimer quantitativement certains paramètres biophysiques intéressants (indice foliaire, concentration en chlorophylle des feuilles, etc.) (Asrar et Dozier, 1994; Sellers, 1985; Kimes *et al.*, 1987). Une approche empirique souvent utilisée consiste à établir des régressions statistiques entre des échantillons des paramètres recherchés et des indices spectraux dérivés de l'image (Tucker, 1979; Verstraete et Pinty, 1996). Cependant, cette méthode est fortement contrainte par la nécessité de mesures terrain et elle est seulement valide pour la configuration d'observation concernée. Une solution pour résoudre ce problème est l'utilisation, en mode "inverse", des modèles physiques qui simulent la mesure des capteurs (Myneni et Ross, 1991; Goel et Strebel, 1983; Kimes *et al.*, 2000; Estève, 1998; Weiss *et al.*, 2000).

Le raisonnement précédent est aussi valable pour la simulation des images de télédétection. Dans ce cas, les modèles sont utilisés, en mode "direct", pour simuler les mesures des capteurs spatiaux ou aéroportés, pour toute configuration d'observation. De telles simulations d'images permettent d'évaluer des performances d'un futur capteur et contribuer à sa conception. Cette approche est utilisée par le CNES (Centre National d'Études Spatiales) pour la conception du futur satellite à très haute résolution spatiale (THR) de la constellation *Pléiades* (Baudoin, 1999).

Les modèles physiques qui simulent la mesure de télédétection dans le domaine spectral du rayonnement solaire réfléchi (*i.e.* avec des longueurs d'onde entre 0.3 µm et 3 µm) peuvent être divisés en deux catégories :

(a) Les modèles simulant l'atmosphère et le paysage terrestre.

(b) Les modèles simulant uniquement le paysage terrestre.

Une des principales limitations des modèles de la catégorie (a) provient des fortes hypothèses simplificatrices utilisées pour représenter la géométrie du paysage. Ainsi, les paysages sont souvent représentés par une 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). D'autres modèles simulent la réflectance des couverts végétaux en les représentant par une superposition de couches homogènes de feuillage (*Liang et Strahler,*1995). Ces limitations sont particulièrement importantes avec les images à très haute résolution spatiale (THR). En effet, la distribution spatiale des éléments du paysage affecte beaucoup les niveaux radiométriques et la texture des images (Gastellu-Etchegorry, 1999).

Les modèles qui n'incluent pas l'atmosphère (b) peuvent négliger l'architecture du paysage, comme les modèles (a) (Verhoef, 1984 ; Kuusk, 1994), ou prendre en compte précisément l'hétérogénéité des paysages (*K-K* de Kimes et Kirchner (1982); *Flight* de North (1996), *Sprint* de Thompson et Goel (1998), *Raytran* de Govaerts et Verstraete (1998)) et OASIS développé par la DGA (Délégation Générale pour l'Armement). La simulation de mesures aéroportées ou spatiales avec ces modèles nécessite un modèle atmosphérique, c'est à dire un modèle de la catégorie (a), pour transformer la mesure au-dessus du paysage en celle au niveau du capteur. Cette approche présente deux inconvénients majeurs : (1) elle néglige l'air contenu dans le paysage, ce qui peut être important dans les paysages de grandes dimensions, et (2) elle ne considère pas l'hétérogénéité spatiale de l'éclairement provenant de la rétrodiffusion atmosphérique. Ces deux contraintes indiquées ci-dessus limitent beaucoup la précision des mesures radiométriques simulées.

D'autre part, il convient de souligner le fait que la simulation de mesures radiométriques, avec les modèles de type (a) ou (b), implique de prendre en compte la réponse impulsionnelle du capteur (Malaret, 1982). Cette étape du processus de simulation ne peut être effectivement réalisée que si le modèle utilisé simule des images, ce qui n'est pas le cas pour beaucoup de modèles.

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. Les images simulées permettent, par exemple, d'analyser la texture pour améliorer la classification d'images (Estève, 1999 ; Gastellu-Etchegorry, 1999). D'autre part, le bilan radiatif combiné avec une

modélisation des mécanismes de transfert d'énergie (évapotranspiration, convection, etc.) permet d'établir le bilan d'énergie des surfaces terrestres (Guillevic, 1999).

Dans sa version de 1996, le modèle DART avait deux inconvénients majeurs. D'une part, il était limité à la simulation de paysages avec des éléments naturels (*i.e.* forêt, prairie, sol nu, etc.). D'autre part, il n'intégrait pas la simulation de l'atmosphère ni du capteur radiométrique.

Mon travail de thèse a eu pour but de transformer le modèle DART en un modèle qui simule les images de télédétection 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 actuels.

Les modifications apportées sont essentiellement : (1) l'introduction d'une modélisation du transfert radiatif atmosphérique, (2) l'amélioration de certaines approximations au niveau de la modélisation du transfert radiatif dans la végétation, (3) la modélisation du transfert radiatif en présence de surfaces opaques quelconques, pour permettre la simulation de nouveaux éléments du paysage (bâtiments, routes, sol avec relief, etc) , (4) la simulation du capteur radiométrique, et (5) développement d'une interface homme-machine afin d'améliorer la convivialité de la saisie des paramètres du modèle et la visualisation de certains types de résultats.

Dans le cadre de la thèse, le modèle DART a été appliqué à deux domaines distincts :

A. Estimation de paramètres biophysiques (indice foliaire, taux de couverture arborée et concentration en chlorophylle des feuilles) de la forêt de Fontainebleau (France) à partir d'images satellitaires SPOT et *Ikonos* (images THR).

B. Aide à la spécification technique des filtres optiques du futur satellite à très haute résolution spatiale de la constellation *Pléiades* en collaboration avec la division QTIS (Qualité et Traitement de l'Imagerie Spatiale) du CNES. Ces travaux se situent dans le cadre du développement exploratoire de la chaîne image à haute et très haute résolution spatiale (Perret, 2000), et des activités thématique système (ATS) en préparation du programme Pléiades (Lefèvre-Fonollosa, 2001). Ces travaux menés ne sont pas présentés dans ce manuscrit, mais figurent dans les rapports de Gex (1999) et Munoz (2000).

Le premier chapitre de cette thèse présente les principes généraux de la version 2001 du modèle DART, ainsi qu'une description simplifiée de son architecture informatique.

Certains aspects informatiques sont mentionnés pour souligner sa simplicité d'utilisation.

Le deuxième chapitre détaille les améliorations et développements apportés au niveau de la simulation du transfert radiatif dans la végétation et au niveau des surfaces opaques (bâtiments, troncs, sol accidenté, murs, etc.).

Le troisième chapitre présente la modélisation du transfert radiatif dans l'atmosphère et son intégration avec le paysage terrestre.

Le dernier chapitre décrit mes travaux sur l'extraction de paramètres biophysiques de la forêt de Fontainebleau par inversion du modèle DART et à partir d'images acquises par les satellites SPOT et *Ikonos* (capteur à très haute résolution spatiale).

# I DESCRIPTION GÉNÉRALE DU MODÈLE DART

Le modèle DART simule des images de télédétection optique et le bilan radiatif des paysages terrestres dans le domaine spectral entre 0.3 µm et 3 µm (ultraviolet, visible, proche infrarouge et moyen infrarouge).

Le modèle simule de façon intégrée trois sous-systèmes :

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

La version 2001 du modèle DART, présentée ici, inclut les améliorations apportées dans le cadre de cette thèse. Ces améliorations ont pour objectif :

- Augmenter la précision radiométrique du transfert radiatif.
- Généraliser à la simulation de tout paysage terrestre (urbain, montagneux, etc.).
- Prise en compte de l'atmosphère et du capteur radiométrique.
- Rendre le modèle simple d'emploi et opérationnel.

Après une brève discussion sur la théorie du transfert radiatif, ce chapitre décrit tout d'abord la représentation du milieu simulé, présente l'algorithme de résolution du transfert radiatif et résume, finalement, l'architecture informatique.

## I.1 Généralités sur le transfert radiatif

Les modèles de transfert radiatif peuvent être divisés, selon la représentation du paysage, en deux catégories : homogènes et hétérogènes. Les modèles homogènes représentent des milieux constitués d'éléments absorbants ou diffusants (feuilles, branches, etc.) distribués de manière horizontalement constante (Idso et de Wit, 1970 ; Ross, 1981 ; Verhoef, 1985 ; Myneni *et al.*, 1989 ). Les modèles hétérogènes représentent des milieux dont les éléments du paysage sont distribués de manière non uniforme selon les trois dimensions de l'espace (North, 1996; Govaerts, 1998).

Les modèles de transfert radiatif reposent sur la théorie de l'optique géométrique (Ditteon, 1997) et du transfert radiatif (Peraiah, 2001). La théorie du transfert radiatif modélise la propagation du rayonnement à l'intérieur d'un milieu. L'équation générale du transfert radiatif (Hapke, 1993) décrit le comportement d'une onde monochromatique

stationnaire, d'intensité I(r,Ω) (Watts par unité d'angle solide), à la position r, et selon une direction Ω :

$$[\xi.\frac{d}{dx} + \eta.\frac{d}{dy} + \mu.\frac{d}{dz}]\ I(r,\Omega) = -\ \alpha(r,\Omega).I(r,\Omega) + \int_{4\pi} \omega(r).\frac{P(r,\Omega'\rightarrow\Omega)}{4\pi}.I(r,\Omega').d\Omega' \qquad (1.1)$$

Où ξ, η et μ sont les cosinus directeurs de la direction de propagation de l'onde selon les axes x, y et z, α(r,Ω) est le coefficient d'extinction ($m^{-1}$), ω(r) est l'albédo de diffusion et P(r,Ω'→Ω) est la fonction de phase, *i.e.* la fraction du rayonnement, intercepté selon la direction Ω', qui est diffusé selon la direction Ω. Le premier terme de la droite de l'équation (1.1) représente l'atténuation de l'onde quand elle se propage dans le milieu. Le deuxième terme est la contribution des ondes diffusées au point r et provenant de toutes les directions de l'espace. Ainsi, ces deux termes correspondent aux phénomènes physiques de la diffusion et de l'absorption. Les longueurs d'onde considérées ici [0.3-3 μm], permettent de négliger le phénomène physique de l'émission thermique (Lenoble, 1993).

L'équation intégro-différentielle (1.1) peut être résolue par la méthode des ordonnées discrètes (Kimes et Kirchner, 1982). Cette méthode consiste à discrétiser la variable angulaire Ω en un nombre $N_{dir}$ de secteurs angulaires contigus. Chaque secteur est caractérisé par une direction centrale $\Omega_n$ et une largeur angulaire $\Delta\Omega_n$. Ainsi, pour un repère cartésien, l'équation tridimensionnelle du transfert radiatif s'écrit :

$$[\mu_n.\frac{d}{dz}+\eta_n.\frac{d}{dy}+\xi_n.\frac{d}{dx}]\ W(r,\Omega_n) = -\alpha(r,\Omega_n).W(r,\Omega_n) + \sum_{m=1}^{Ndir} \omega(r).\frac{P(r,\Omega_m\rightarrow\Omega_n)}{4\pi}.W(r,\Omega_m).\Delta\Omega_n \qquad (1.2)$$

Où les termes liés à la source $W(r,\Omega_n)$ sont des puissances (Watts) égales à l'expression $I(r,\Omega_n).\Delta\Omega_n$ (***Figure I.1***). Pour assurer une bonne discrétisation de l'équation (1.1), les valeurs des angles solides $\Delta\Omega_n$ doivent être suffisamment faibles. Sa valeur maximale dépend principalement de l'anisotropie de la fonction de phase et du degré d'hétérogénéité du milieu.

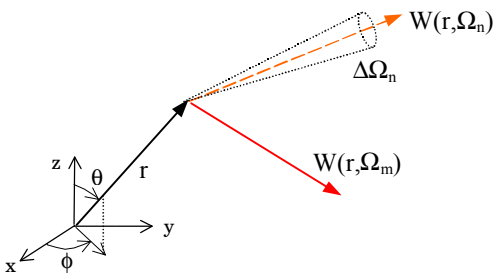



*Figure I.1 : Schéma de l'équation générale du transfert radiatif.*

Pour un milieu hétérogène, l'équation (1.2) est résolue numériquement avec la méthode du suivi de rayons combinée avec une discrétisation de l'espace (Kimes et Kirchner, 1982). Cette méthode consiste à suivre dans l'espace un ensemble fini de rayons $W_0(r,\Omega_n)$ issus des sources présentes. Lors de la propagation d'un rayon source dans une direction $\Omega_n$, sa puissance diminue car il est totalement ou partiellement intercepté par le milieu. La diffusion du rayonnement intercepté engendre de nouveaux rayons $W_1(r,\Omega_n)$ selon les $N_{dir}$ directions de l'espace. Ces rayons sont à nouveau suivis et engendrent eux-mêmes de nouvelles diffusions $W_k(r,\Omega_n)$ (avec $k \in [2,\infty[$ ) (*Figure I.2*). Un rayon est éliminé si son énergie devient inférieure à un seuil.

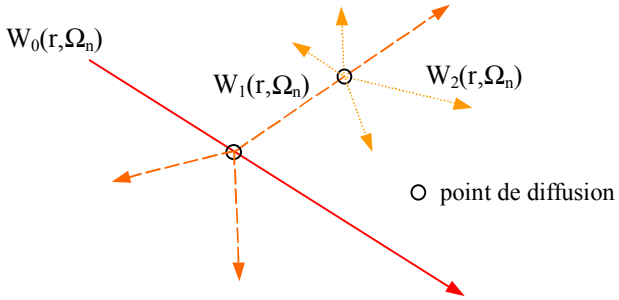



*Figure I.2 : Schéma du mécanisme de diffusion.*

Le milieu est discrétisé sous forme d'une matrice de cellules parallélépipédiques juxtaposées (*Figure I.3*). Cette représentation permet de limiter le nombre de rayons à suivre dans la mesure où il est supposé que les diffusions qui surviennent dans une cellule sont calculées, et effectivement émises, à partir d'un seul point source (dit "point milieu" ou "barycentre énergétique").

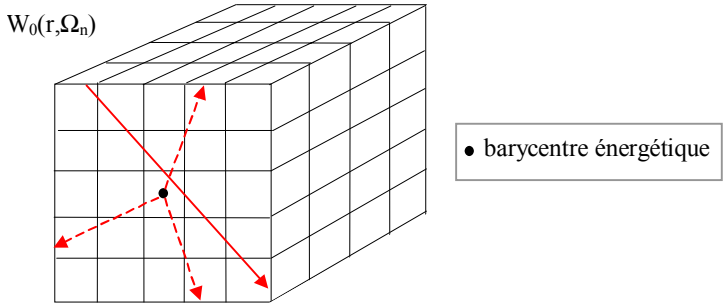



*Figure I.3 : Schéma de l'émission des diffusions à partir du barycentre énergétique.*

La résolution informatique du transfert radiatif, à l'intérieur d'un milieu hétérogène, limite l'étendue spatiale des paysages considérés. Néanmoins, il est possible de traiter des paysages infinis mais répétitifs. La technique utilisée consiste à simuler le suivi de rayons uniquement dans le motif qui génère, par répétition, l'ensemble du milieu. Dans

ce suivi, les rayons qui sortent par un côté du motif sont re-injectés par le côté opposé (*Figure I.4*).

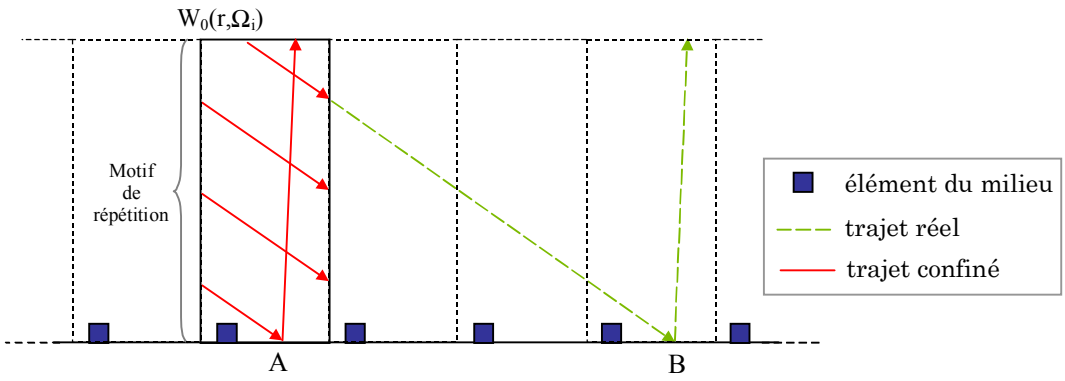



*Figure I.4 : Exemple de suivi de rayons pour une maquette infinie répétitive. Les deux trajectoires représentent le trajet réel suivi par un rayon à l'intérieur d'un paysage répétitif et le trajet d'un rayon confiné à l'intérieur de la maquette. Les points A et B sont équivalents.*

## I.2 Maquette du paysage et de l'atmosphère

Le système paysage-atmosphère, *i.e.* l'ensemble constitué par le paysage terrestre et l'atmosphère, est le milieu à l'intérieur duquel DART simule le transfert radiatif. La discrétisation de ce système, appelée ici maquette, est un parallélépipède constitué de cellules, également parallélépipédiques, de dimensions diverses (*Figure I.5*).

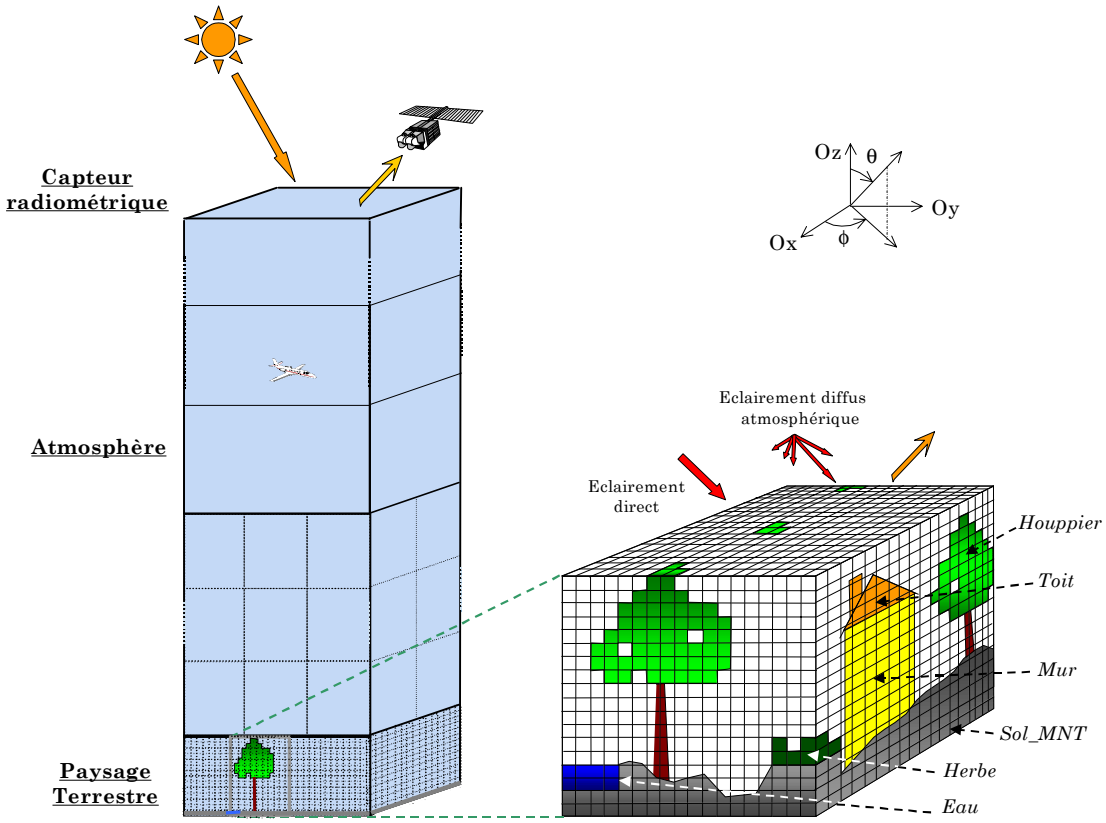



*Figure I.5 : Représentation schématique du système paysage-atmosphère-capteur.*

Les dimensions de la maquette selon les axes Ox, Oy et Oz sont DX, DY et 100km. Le paysage terrestre est contenu dans un parallélépipède de dimensions DX, DY et DZ composé de cellules de dimensions ΔX, ΔY et ΔZ. L'atmosphère est représentée jusqu'à 100 km, altitude au-dessous de laquelle se situe l'essentiel des constituants atmosphériques (gaz et aérosols).

Le type de chaque cellule de la maquette est défini par la matière qu'elle contient (*Figure I.6*). Le modèle traite plusieurs types de cellules associées aux différents composants du paysage : *Houppier* (pour le feuillage des arbres), *Tronc, Herbe, Sol, Eau, Route, Mur, Toit et* Air.

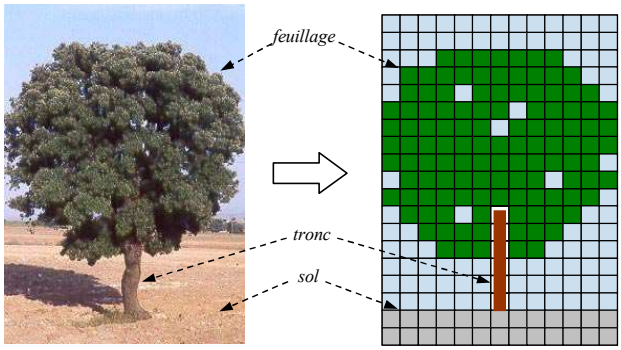



*Figure I.6 : Conversion du paysage terrestre en maquette DART.*

Les cellules sont classées en deux catégories (*Figure I.7*) :

(1) Les cellules appelées "turbides" caractérisées par des interactions onde-matière volumiques (*Houppier*, *Herbe* et *Air*). Ces cellules sont définies par un ensemble de paramètres permettant de déterminer le coefficient d'extinction, la fonction de phase et l'albédo associés.

(2) Les cellules appelées "opaques" où surviennent uniquement des interactions avec des surfaces opaques (*Tronc, Sol*, *Eau, Route*, *Mur et Toit*). Ces cellules sont définies par les fonctions de phase et albédos de chacune des surfaces opaques qu'elles contiennent.

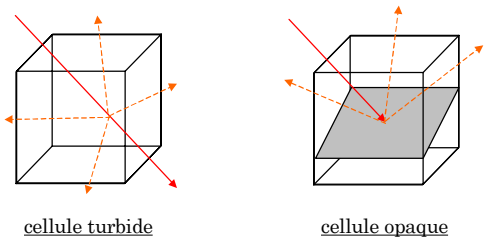



*Figure I.7 : Schéma des diffusions volumiques (cellule turbide) et surfaciques (cellule opaque).*

Ces deux types de cellule sont décrits en détail dans le *Chapitre II*.

La représentation discrète de l'atmosphère (*cf.* § III) est faite avec trois couches dont les cellules sont de tailles différentes :

- Basse atmosphère (BA), qui correspond à l'air contenu à l'intérieur du paysage terrestre, *i.e.* les cellules de type *Air* comprises entre le sol et l'altitude maximale du paysage.
- Moyenne atmosphère (MA), entre la basse atmosphère et une altitude de 4 km.
- Haute atmosphère (HA), entre la limite supérieure de la moyenne atmosphère et une altitude de 100 km.

## I.3 Éléments du paysage

La maquette du paysage terrestre utilisée par DART est constituée de 4 types de composants (sol, végétation, éléments urbains et surfaces d'eau) caractérisés par des paramètres optiques et géométriques présentés ci-dessous et détaillés dans l'Annexe C.

Sol

Le sol d'une maquette peut être plat ou accidenté. Le relief est représenté en tant que juxtaposition de triangles déduits d'un Modèle Numérique du Terrain (MNT) qui donne l'altitude ($H_{MNT}$) pour un ensemble discret de points (x,y) dans le repère Ox, Oy de la maquette. Les points du MNT (*e.g.*, les points A, B, C, D, E et F de la *Figure I.8* ) sont les sommets des triangles du sol. Les cellules traversées par ces triangles, constituant le sol accidenté, sont de type *Sol_MNT*. La *Figure I.8* montre l'architecture du sol avec relief.

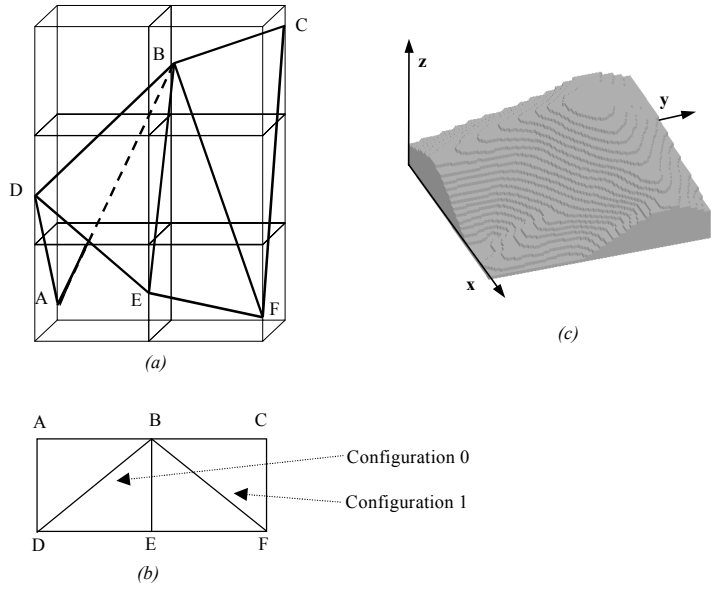



*Figure I.8 : Triangularisation du MNT. Visualisation 3D (a) et en vue du dessus (b) des triangles. Les triangles sont placés suivant deux configurations (0 et 1). Visualisation 3D des cellules constituant le MNT (c).*

La réflectance du sol plat peut être un modèle lambertien avec une composante spéculaire, le modèle de Hapke (1981) avec une composante spéculaire ou être définie par l'utilisateur (*cf.* § II.2). Dans le cas particulier de sols avec une réflectance lambertienne, il est possible d'introduire une variabilité spatiale aléatoire de la réflectance. Dans ce cas, la réflectance est caractérisée par une valeur moyenne $\rho_{sol}$ et un écart type $\sigma_{\rho sol}$ .

Végétation

Le paysage terrestre peut inclure des arbres et une couche homogène de végétation au-dessus du sol, avec ou sans relief. Cette couche est définie par une hauteur moyenne, un écart type de la hauteur et des paramètres qui définissent les propriétés du feuillage (*cf.* § II.1).

Un paysage peut contenir des arbres de plusieurs espèces. Une espèce d'arbre est définie par la forme du houppier (***Figure I.9***), le taux de remplissage du houppier et les paramètres qui définissent le feuillage (*cf.* § II.1).

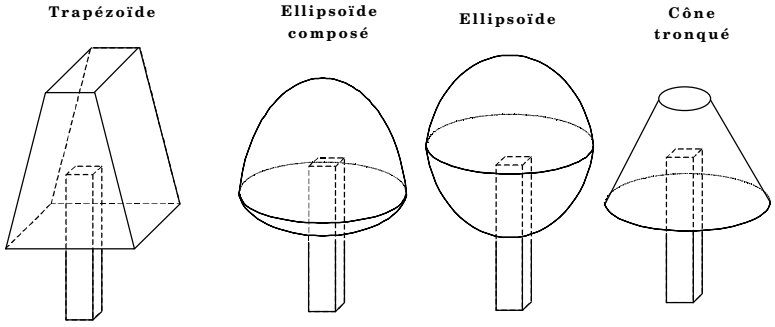



*Figure I.9 : Formes des houppiers. Les houppiers effectifs de la maquette résultent du maillage de ces formes schématiques avec des cellules parallélépipédiques.*

Les positions et les dimensions des arbres de chaque espèce peuvent être définies de trois façons :

- *Positions exactes et dimensions aléatoires* : Le type et la position exacte de chaque arbre sont définis à l'aide d'un fichier contenant les coordonnées (x,y). Les dimensions des troncs et des houppiers sont des variables aléatoires gaussiennes de moyenne et écart type spécifiques à chaque espèce d'arbre.
- *Positions et dimensions aléatoires* : Les arbres sont placés de manière aléatoire dans des cercles de rayon (r) centrés sur les nœuds d'une grille de points de maille ($\Delta X_{grille}$, $\Delta Y_{grille}$) (***Figure I.10***), avec pour chaque nœud, une probabilité de présence ($P_{arbre}$). Les dimensions des troncs et houppiers sont des variables aléatoires gaussiennes de moyenne et écart type spécifiques à chaque espèce d'arbre.

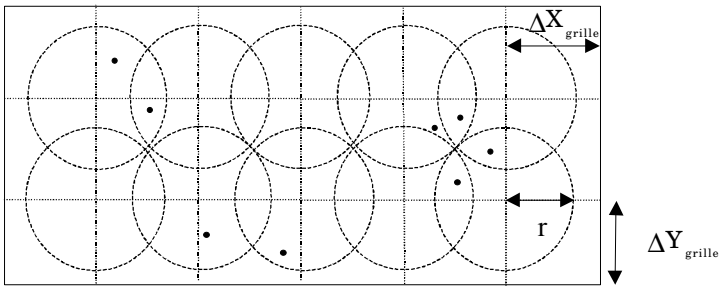



*Figure I.10 : Exemple de distribution aléatoire de la position des arbres (•). $P_{arbre}$=0.8.*

- *Positions et dimensions exactes* : Toutes les caractéristiques des arbres de chaque espèce sont définies de manière exacte à l'aide d'un fichier (*cf. Annexe C*). La *Figure I.11* présente un exemple de forêt générée par cette méthode.

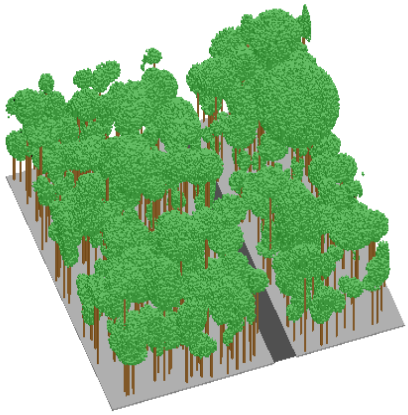


*Figure I.11 : Représentation 3D de la maquette d'une forêt tropicale simulée.*

Éléments urbains

Tout paysage urbain est composé à l'aide de trois éléments : bâtiments, murets et routes (*Figure I.12*). Ces éléments sont constitués de quadrilatères et/ou triangles opaques (Benech, 2000).

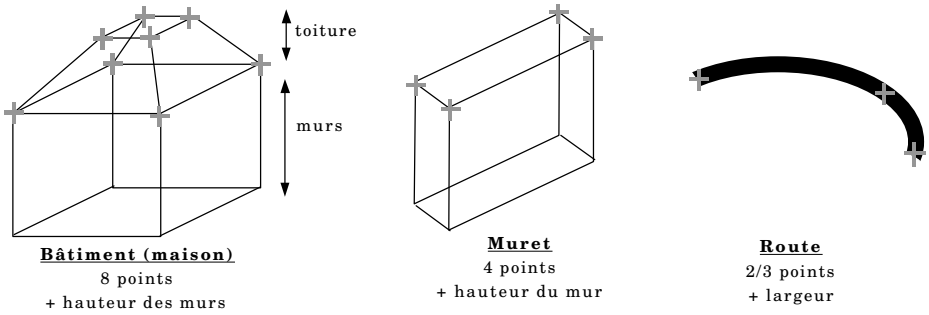



*Figure I.12 : Schémas de la géométrie d'une maison, d'un muret et d'une route.*

- *Bâtiment* : Un bâtiment est composé d'un ensemble d'éléments appelés "maisons". Une "maison" comprend une toiture et quatre murs. La forme d'un bâtiment peut donc être

complexe puisque les petits éléments urbains, tels que les cheminées, les colonnes, etc., peuvent être générés à l'aide de bâtiments complémentaires.

- *Muret* : Un muret est défini par les quatre sommets supérieurs et sa hauteur.

- *Route* : Une route est définie géométriquement par les coordonnées horizontales (x,y) de 2 ou 3 points et sa largeur. La projection verticale de la route sur un plan horizontal correspond au polynôme qui passe par les deux ou trois points. En présence d'un sol avec relief, la route se substitue à la topographie : les cellules de type *Sol_MNT* deviennent des cellules de type *Route_MNT*.

La réflectance des éléments urbains peut être lambertienne, lambertienne avec une composante spéculaire ou de type Hapke avec une composante spéculaire (*cf.* § II.2).

Surfaces d'eau

Les surfaces d'eau sont des lacs ou des rivières. Les rivières sont définies avec les mêmes paramètres que les routes, *i.e.* 2 ou 3 points et une largeur. Les lacs sont caractérisés par une forme elliptique (centre et deux demi-axes). Comme pour la route, les surfaces d'eau sont superposables à un sol avec du relief. Dans ce cas, les cellules d'eau sont de type *Eau_MNT*.

Génération directe de la maquette

Une alternative à la génération de paysages proposée par le modèle est une édition directe des fichiers informatiques qui contiennent la description de la maquette du paysage (*cf.* § I.2.6).

Ainsi, par exemple, il est possible d'importer une description précise d'un site urbain définie avec le logiciel de dessin technique *Autocad* (*http://www.autodesk.com/autocad*) et en développant une interface avec DART.

## I.4 Algorithme de simulation

L'équation du transfert radiatif (1.1) est résolue en prenant en compte les caractéristiques géométriques et physiques du milieu de propagation (*Figure I.5*). Les principales étapes de la simulation sont résumées dans le schéma de la *Figure I.13*. L'algorithme simule le parcours et la transformation de rayons lancés dans une maquette constituée selon les principes énoncés précédemment (*cf.* § I.1 et I.2).

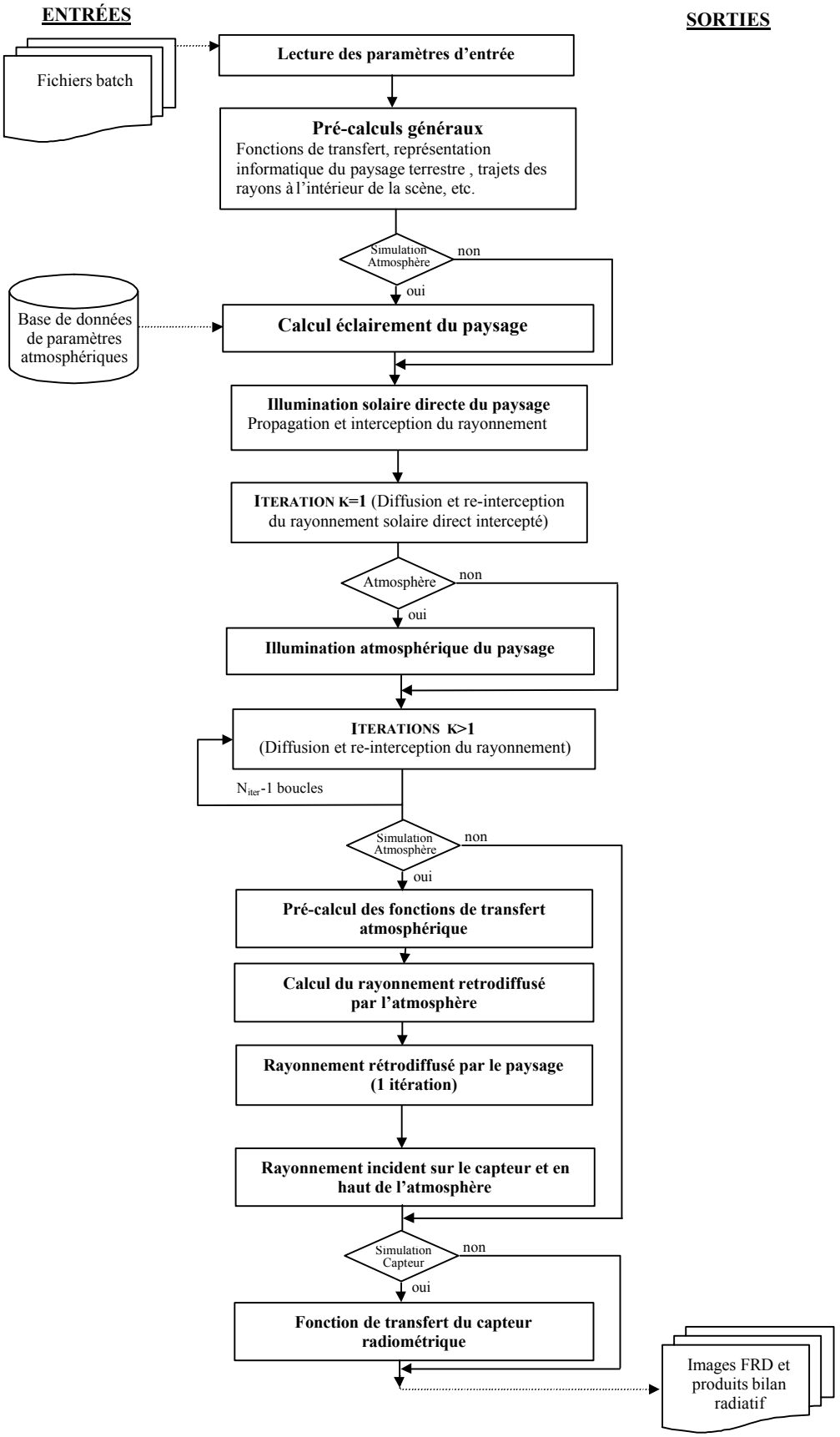



*Figure I.13 : Diagramme d'enchaînement de tâches du modèle DART.*

Pré-calculs généraux

Cette étape précède le transfert radiatif proprement dit. Elle comprend la création de la maquette et la définition d'un ensemble discret de $N_{dir}$ directions de propagation. Toute direction est définie par les angles zénithal ($\theta_i$) et azimutal ($\varphi_i$) ainsi que par l'angle solide autour de la direction ($\Delta\Omega_i$). La direction verticale ascendante et la direction solaire ascendante (*hot-spot*) font partie des directions discrètes. L'espace autour du *hot-spot* peut être sur-échantillonné, de même que le plan principal (*i.e.*, plan qui inclut la direction du nadir et la direction solaire) et le plan orthogonal au plan principal.

Calcul de l'éclairement du paysage

Le rayonnement solaire en haut de l'atmosphère $W_{TOA}(\Omega_s)$ (*TOA pour Top Of the Atmosphere*) est transmis à travers la haute et moyenne atmosphère jusqu'au paysage terrestre. Par la suite, le rayonnement incident sur le paysage terrestre $W_{BOA}$ ($\Omega_n$) (BOA pour *Bottom of the Atmosphere*) comprend deux termes : le rayonnement solaire direct $W_{BOA,dir}(\Omega_s)$ (rayonnement transmis sans interception par l'atmosphère) et le rayonnement diffus $W_{BOA,diff}(\Omega_n)$ (rayonnement transmis après interception et diffusion par l'atmosphère).

Dans le modèle DART, quand la simulation atmosphérique n'est pas activée, l'éclairement du paysage terrestre peut être considéré isotrope et spécifié simplement en indiquant la fraction du rayonnement diffus dans l'éclairement du paysage terrestre (SKYL), ou peut être défini par l'utilisateur.

Le transfert radiatif dans l'atmosphère est détaillé dans le *Chapitre III*.

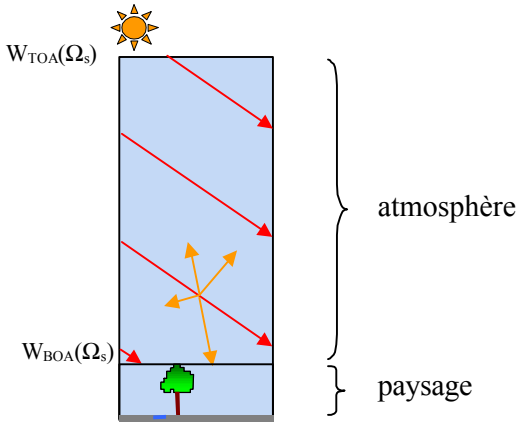



*Figure I.14 : Éclairement du paysage terrestre.*

Illumination solaire directe du paysage

À l'*itération k=0*, le paysage terrestre est éclairé par le rayonnement solaire direct ( $W_{BOA,dir}(\Omega_s)$ ) (***Figure I.15***). Cette illumination est simulée avec un ensemble fini de rayons qui se propagent dans la maquette du paysage à partir du haut de celle-ci. Dans cette étape, les rayons sont simplement suivis dans le paysage, et donc plus ou moins interceptés, tant que leur énergie est supérieure à un seuil $T_1$. L'énergie perdue par les rayons, *i.e.* l'énergie interceptée par les cellules, est stockée dans les cellules, puis partiellement diffusée à l'itération k=1.

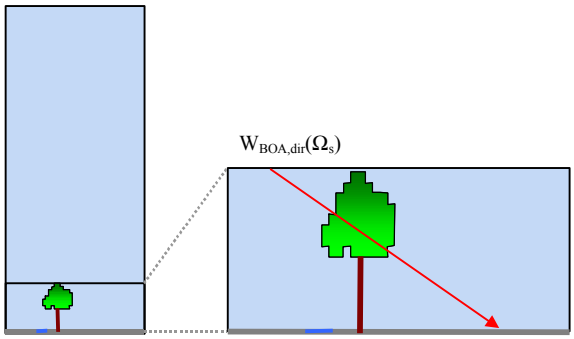



*Figure I.15 : Schéma de l'illumination solaire directe du paysage.*

*Itération k=1*

Toute cellule qui a intercepté de l'énergie lors de l'illumination solaire directe du paysage terrestre diffuse une fraction de cette énergie (***Figure I.16***). Pour les $N_{dir}$ directions de diffusion possibles, chaque rayon diffusé est suivi dans la maquette jusqu'à ce qu'il sorte par le haut de la maquette ou, qu'il soit totalement intercepté ou, que son énergie devienne inférieure à un seuil $T_2$ dépendant de l'angle solide de la direction du rayon. Le rayonnement intercepté au cours de ces trajets est de nouveau stocké en vue d'une diffusion ultérieure. La modélisation des interactions onde-matière mises en jeu est décrite dans le *Chapitre II*.

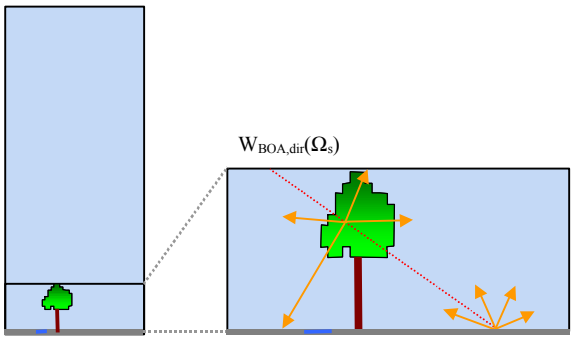



*Figure I.16 : Schéma de l'itération k=1.*

Illumination atmosphérique du paysage

Le rayonnement atmosphérique issu de l'atmosphère $W_{BOA,diff}(\Omega_n)$, pour chaque direction $\Omega_n$ descendante, est introduit dans la maquette du paysage et se propage à partir du haut du paysage (*Figure I.17*).

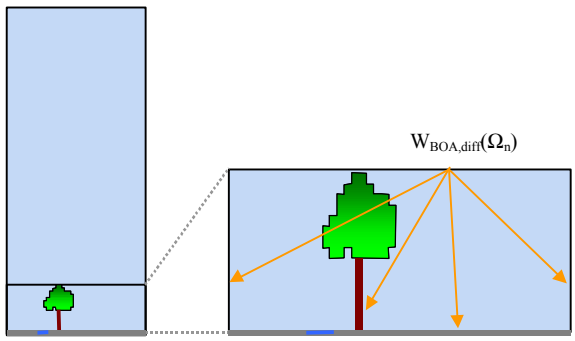



*Figure I.17 : Schéma de l'illumination atmosphérique du paysage.*

*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. Ce processus se réitère jusqu'à ce que tous les rayons sortent par le haut de la maquette ou deviennent inférieurs au seuil $T_2$ défini par l'opérateur. Pour une cellule du niveau supérieur de la maquette du paysage et de coordonnées horizontales (i,j), les rayons sortant de la maquette par le haut, selon la direction d'observation $\Omega_v$, constituent l'image FRD (facteur de réflectance directionnelle) en bas de l'atmosphère $W_{BOA}(i,j,\Omega_v)$ :

$$FRD(\Omega_s , \Omega_v) = \pi.\frac{L(\Omega_v)}{E_{BOA}} \tag{1.1}$$

$$\text{où} \quad L(\Omega_v) = \frac{W_{BOA}(i,j,\Omega_v)}{\Delta X.\Delta Y.\mu_v.\Delta\Omega_v} \quad \text{et} \quad E_{BOA} = \frac{W_{dir\ BOA} + \sum_n W_{diff\ BOA}(\Omega_n)}{\Delta X.\Delta Y} \tag{1.2}$$

$$FRD(\Omega_s , \Omega_v) = \pi.\frac{W_{BOA}(i,j,\Omega_v)}{\mu_v.\Delta\Omega_v}.\frac{1}{W_{dir\ BOA} + \sum_n W_{diff\ BOA}(\Omega_n)} \tag{1.3}$$

Ces images FRD sont obtenues pour toutes les directions d'observation. La résolution des images générées en sortie du modèle est égale aux dimensions horizontales des cellules de la maquette du paysage ($\Delta X$, $\Delta Y$). Le modèle calcule aussi la distribution tridimensionnelle des énergies absorbées et interceptées par les cellules.

La propagation du rayonnement est suivie jusqu'à l'itération $N_{iter}$ ou à une itération inférieure si la variation relative de l'albédo de la maquette du paysage est inférieure à un seuil $T_3$ défini par l'opérateur.

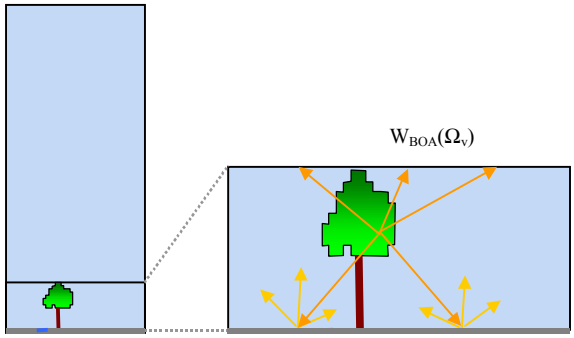



*Figure I.18 : Schéma de l'itération k>1.*

Calcul des fonctions de transfert atmosphériques et de l'éclairement de couplage

Si la simulation atmosphérique est activée, les fonctions de transfert atmosphérique (*cf.* § III) sont calculées afin de simuler l'éclairement de couplage (énergie retro-diffusée par l'atmosphère vers le bas) et la propagation du rayonnement issu du paysage terrestre jusqu'au sommet de l'atmosphère ainsi qu'au capteur radiométrique. Les rayons montants qui atteignent le haut de l'atmosphère ( $W_{TOA}(i, j, \Omega_v)$ ) et le niveau du capteur ( $W_{capt}(i, j, \Omega_v)$ ) constituent aussi des images FRD.

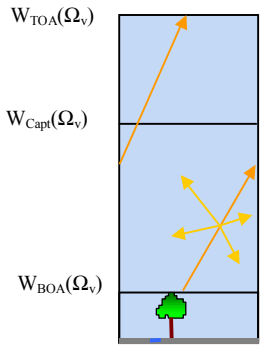



*Figure I.19 : Schéma du rayonnement montant jusqu'au capteur et le haut de l'atmosphère.*

Simulation du capteur radiométrique

Le rayonnement reçu en entrée du capteur $W_{Capt}(i, j, \Omega_v)$ peut être transformé en l'image effectivement acquise par le capteur IMAGE(i,j,Ω). Cette conversion comprend cinq étapes majeures (*Figure I.20*) (Malaret, 1982; Valorge, 2000) :

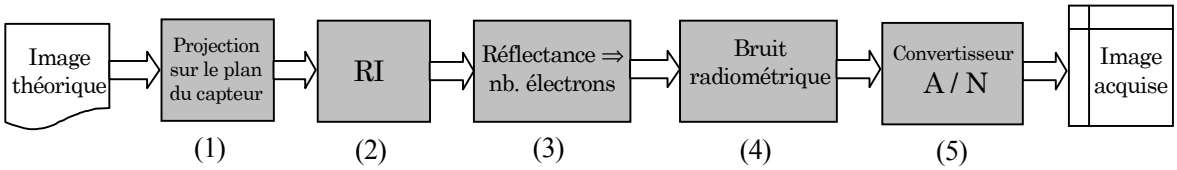



*Figure I.20 : Schéma de la chaîne de simulation du système radiométrique.*

(1) Projection de l'image horizontale dans le plan du capteur (*Figure I.21*).

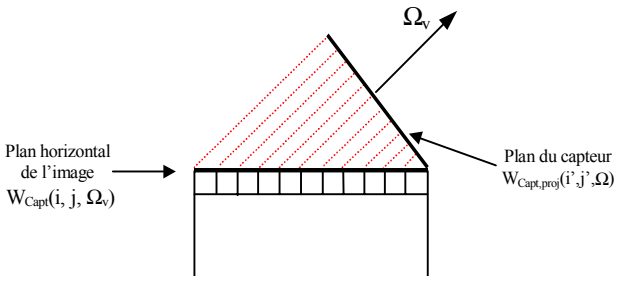



*Figure I.21 : Schéma de la projection de l'image sur le plan du capteur.*

(2) Convolution de l'image DART projetée $W_{Capt,proj}(i',j',\Omega)$ avec la réponse impulsionnelle (RI) (*Figure I.22*) du capteur, déterminée à partir des RI de l'optique du télescope, du détecteur et du déplacement du capteur sur le paysage.

$$W_{Capt,\,RI}(i',j',\Omega) = \sum_{i'} \sum_{;j'} W_{Capt,proj}(m,n,\Omega) \,.\, RI(i'-m,\, j'-n) \qquad (1.4)$$

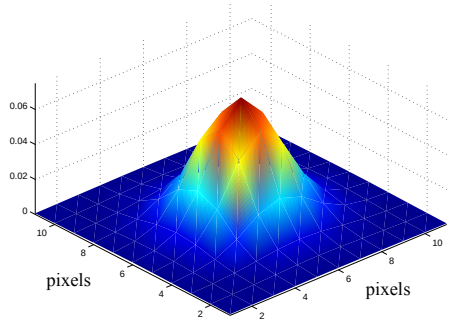



*Figure I.22 : Exemple de réponse impulsionnelle.*

(3) Conversion de la mesure effective du détecteur radiométrique $W_{Capt,\,RI}(i',j',\Omega)$ en un nombre d'électrons $N_{e^-}$ à l'aide d'un facteur multiplicatif $A_1$.

$$N_{e^-}(i',j',\Omega) = A_1 \,.\, W_{Capt,RI}(i',j',\Omega) \qquad (1.5)$$

(4) Ajout d'un bruit radiométrique additif. Ce bruit comprend deux composantes :

- Un bruit indépendant de la valeur du signal caractérisé par une variable aléatoire $X_0$ de loi uniforme et d'écart type $\sigma_0$ .
- Un bruit dépendant du niveau du signal représenté par une variable aléatoire $X_S$ de loi gaussienne et d'écart type : $\sqrt{N_{e^-}}$ .

Les bruits sont dus à l'incohérence de la lumière et à la chaîne électronique de lecture et d'amplification.

$$N_{e^-,\,bruité}(i',j',\Omega) = N_{e^-}(i',j',\Omega) + X_{uniforme}(\sigma_0) + X_{gaussien}(N_{e^-}(i',j',\Omega)^{0.5}) \qquad (1.6)$$

(5)Quantification de l'image sur 8 bits avec un étalement maximal de la dynamique. Elle équivaut à l'ajout d'un bruit additionnel de quantification.

$$IMAGE(i',j',\Omega) = Q_{8bits}[N_{e^-,\,bruité}(i',j',\Omega)] \qquad (1.7)$$

## I.5 Produits du modèle

Produits "FRD"

| TYPE | PRODUITS SELECTIONNABLES | OPTIONS |
|---|---|---|
| **FRD** | Image FRD | • TOA<br>• BOA<br>• Simulation du capteur<br>• Extrapolation<br>• Toutes les itérations<br>• Fonction de transfert du capteur<br>• Composante du FRD selon les trajets atmosphériques (cf. § IV) |
| | FRD moyen | |
| | Image FRD et FRD moyen avec uniquement la contribution des arbres, du sol et/ou de l'herbe. | |
| | Image FRD du rayonnement polarisé | |

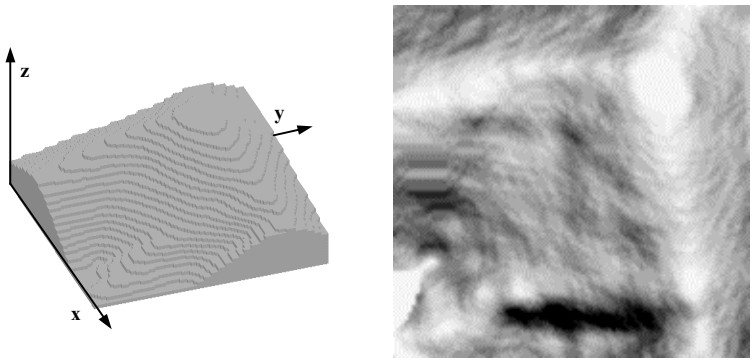
*Tableau I.1 : Ensemble des produits facteur de réflectance directionnelle du modèle.*

Les produits FRD (*Tableau I.1*) sont des réflectances moyenes et des images réflectance. Ils sont fournis pour le bas de l'atmosphère (BOA : *Bottom Of the Atmosphere*) (*Figures I.23* et *I.24*), pour le haut de l'atmosphère (TOA : *Top Of the Atmosphere*) (*Figures I.25 et I.26*) et pour le capteur radiométrique. Le modèle propose en option le FRD associé au rayonnement polarisé (Pinel, 1997), ainsi que le rayonnement diffusé en dernier par le feuillage des arbres, le sol ou la couche homogène de végétation. Une option permet d'obtenir les produits FRD à chaque itération (1 à $N_{iter}$) et à une itération dite infinie, issue d'une extrapolation exponentielle des résultats des trois dernières itérations. L'image FRD et la maquette ont la même taille horizontale en nombre de cellules ($DX/\Delta X$, $DY/\Delta Y$). La résolution peut être diminuée en réalisant des moyennes sur l'image. Ceci permet de simuler des capteurs avec une résolution inférieure à celle des éléments du paysage (*e.g.* les capteurs spatiaux SPOT, Landsat, MODIS ou POLDER).

Quand la simulation du capteur radiométrique est sélectionnée, le modèle projette l'image sur le plan du capteur. Autrement, l'image sortante géoréférencée doit être projetée sur le plan du capteur avec un logiciel de traitement d'image standard comme ILWIS (ILWIS, 2001).

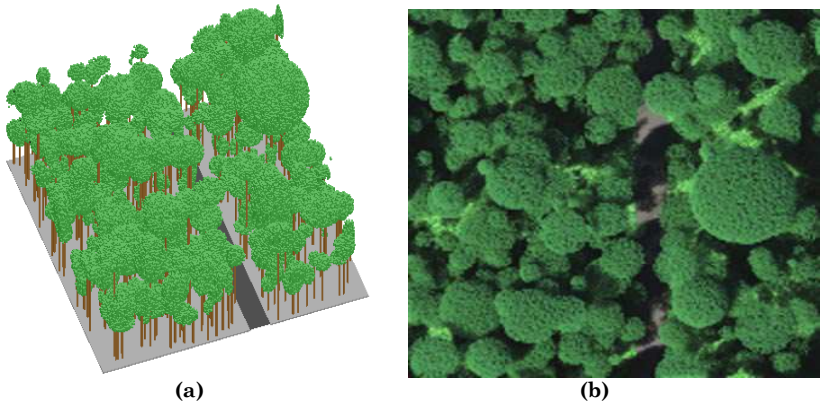
Le modèle peut aussi calculer, une par une, les composantes ($\rho_{atm}$, $\rho_{direct\text{-}direct}$, etc.) des images acquises par un capteur et celles obtenues au sommet de l'atmosphère. (*cf. § III*).

Les exemples ci-dessous ont été exécutés sur une station de travail Sun Enterprise 450 bi-processeur à 296MHz. La légende des figures inclut les temps de calcul ($T_{calcul}$) approximatifs.




(a) (b)

*Figure I.23 : Visualisation des cellules d'un MNT de 100x100 cellules (a). Image simulée avec ($\theta_s$=$\theta_v$=0°) (b). Le temps de calcul est $T_{calcul}$≈ 6 minutes.*



(a) (b)

*Figure I.24 : Représentation 3D d'une parcelle de forêt tropicale de 100x100 cellules (a). Composition colorée RVB simulée avec $\theta_v$=0° et $\theta_s$=30° (b). Le temps de calcul ($T_{calcul}$≈ 40 minutes) est supérieur à celui du paysage de la Figure I.21. Ceci est dû aux cellules "turbides" de végétation car la gestion de leurs diffusions de volume est beaucoup plus coûteuse en temps de calcul que la gestion des diffusions de surface.*

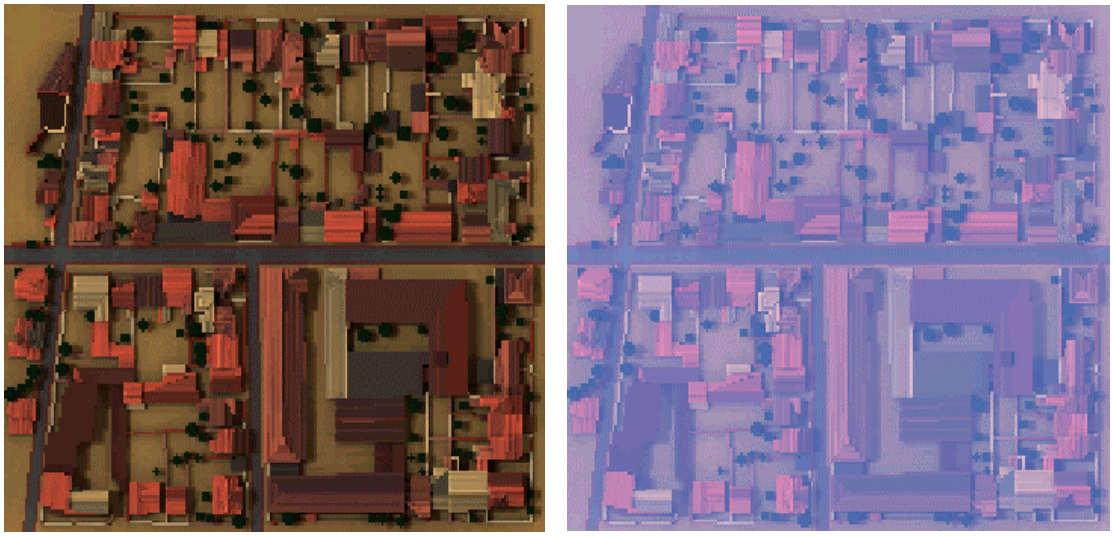


*Figure I.25 : Composition colorée RVB de paysage urbain (zone de la ville de Toulouse) en bas (gauche) et en haut (droite) de l'atmosphère. Images simulées par la société* Noveltis (Decoster, 2000). *$T_{calcul}$≈ 20 minutes par bande spectrale.*

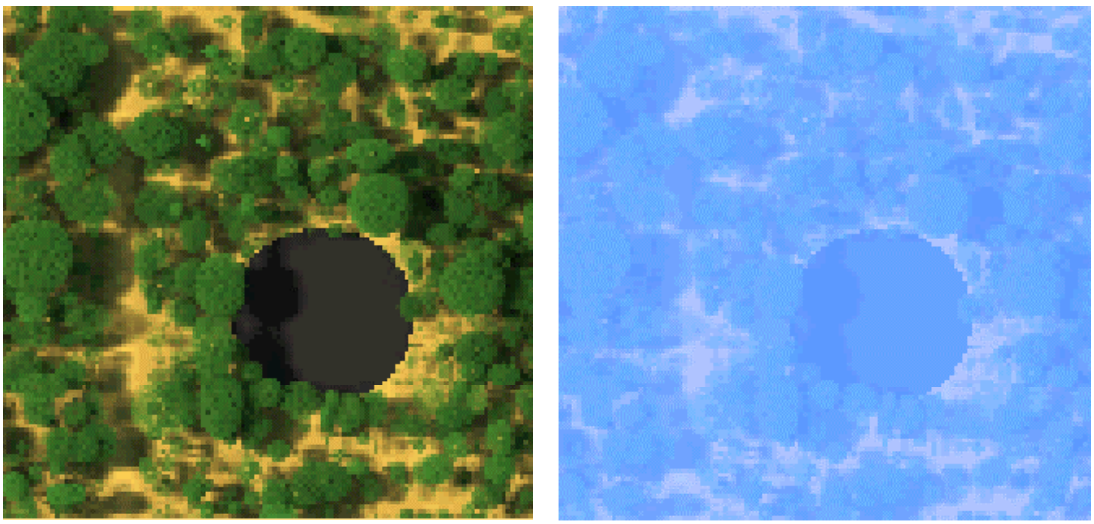


*Figure I.26 : Composition colorée RVB de paysage naturel en bas (gauche) et en haut (droite) de l'atmosphère. Images simulées par la société Noveltis. $T_{calcul} \approx$ 35 minutes par bande spectrale.*

Produits "Bilan radiatif"

| TYPE | PRODUIT | OPTIONS |
|---|---|---|
| **Bilan Radiatif** | Profils verticaux de fIR et fAR par itération. | • Extrapolation |
| | Matrices 3D de fIR et fAR par itération | |
| | Puissance diffusée, interceptée et descendante par cellule et itération | / |
| | Distribution angulaire de l'éclairement atmosphérique BOA ($W/m^2$) | / |
| | Profil vertical du rayonnement absorbé par l'atmosphère ($fAR_{ATM}$) | / |

*Tableau I.2 : Ensemble des produits "bilan radiatif".*

Les produits bilan radiatif (*Tableau I.2*) incluent la fraction de rayonnement incident (fIR : *fraction of Incident Radiation*) et absorbé (fAR : *fraction of Absorbed Radiation*) par rapport au rayonnement incident sur le paysage terrestre. Le produit fIR correspond à l'éclairement des faces supérieures des cellules par les rayons descendants. Les quantités fIR et fAR sont données sous forme de matrice 3D et de profil vertical 1D. Elles peuvent être extrapolées à partir des trois dernières itérations. Pour une simulation dans la bande spectrale du visible (entre 450nm et 700nm) alors fAR = fAPAR (*fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation*).

Produits "Indice foliaire "

Les deux produits "indice foliaire" (*Tableau I.3*) sont calculés à partir de la maquette informatique du paysage terrestre. La matrice 3D contient pour chaque cellule de la maquette la valeur de l'indice foliaire ($m^2$ de feuillage par $m^2$ de sol). Le profil résulte d'un simple moyennage horizontal de la matrice 3D.

| TYPE | PRODUIT | OPTIONS |
|---|---|---|
| **Indice Foliaire** | Profil vertical du LAI | / |
| | Matrice 3D du LAI | |

*Tableau I.3 : Ensemble des produits "indice foliaire".*

## I.6 Architecture informatique

L'architecture informatique du modèle DART comprend six modules principaux (*Figure I.27*) :

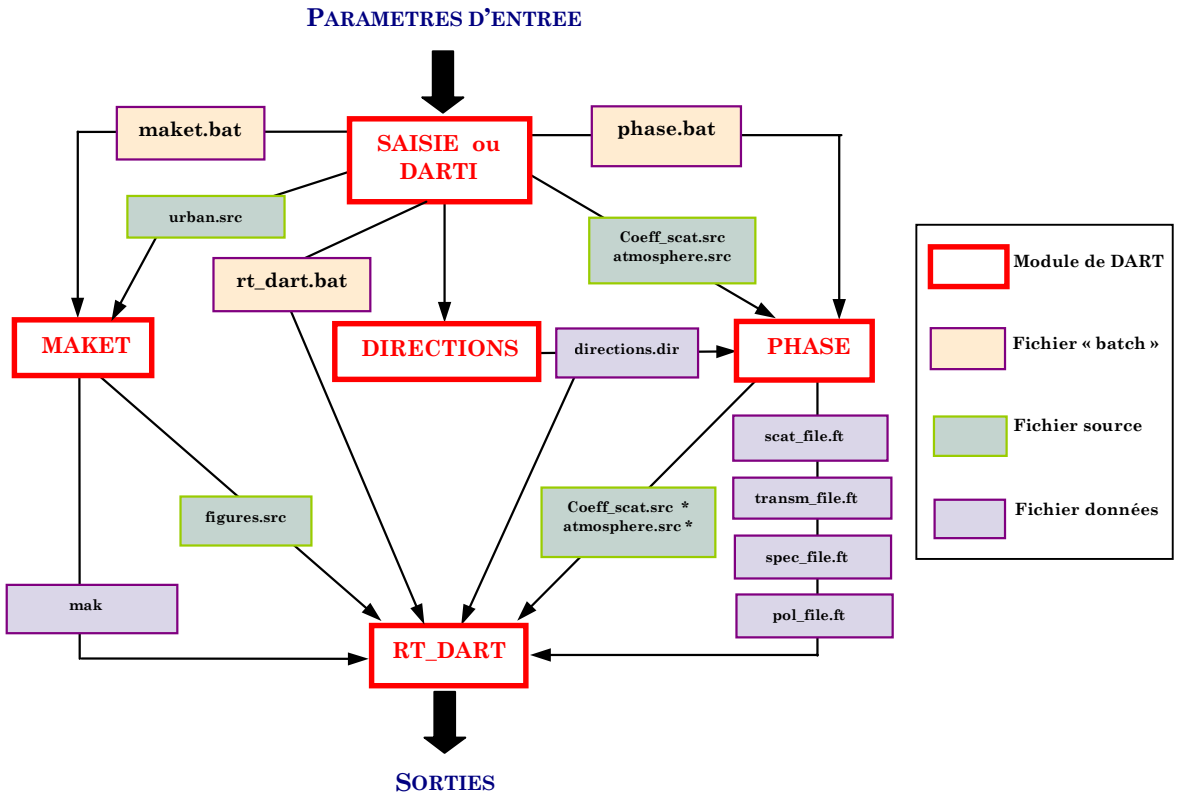



*Figure I.27 : Schéma de l'architecture informatique de DART.*

*Modules d'interfaçage homme-machine :*

- DARTI : Interface homme-machine qui permet de saisir les paramètres du modèle, d'exécuter les modules de calcul et de visualiser certains produits.
- SAISIE : Saisie en mode texte des paramètres du modèle.

*Modules de calcul :*

- DIRECTION : Calcul du fichier contenant les directions discrètes ($\Omega_i$ , $\Delta\Omega_i$).
- MAKET : Création de la maquette du paysage terrestre.
- PHASE : Calcul (1) des fonctions de transfert de la végétation et des surfaces opaques, et (2) des propriétés de l'atmosphère à partir d'une base de données.
- RT_DART : Simulation du transfert radiatif dans le système paysage-atmosphère avec l'option de simuler le capteur radiométrique.

DARTI

DARTI (pour *DART Interactive*) est une Interface Homme-Machine (IHM) qui gère la saisie interactive des paramètres, exécute les autres modules et permet de visualiser certains résultats. DARTI génère les fichiers batch de chaque module de calcul (*phase.bat, maket.bat* et *rt_dart.bat*) ainsi qu'un fichier batch général qui regroupe l'information contenue dans les batch de tous les modules (*saisie.bat*) (*cf. Annexe C*). Toutes les propriétés optiques des feuilles et des surfaces opaques sont stockées dans le fichier texte *coeff_scat.src (Figure I.28)*, les paramètres atmosphériques dans le fichier *atmosphere.src* (*cf. Annexe C*) et la géométrie des éléments urbains dans le fichier *urban.src* (*cf.Annexe C*).

```
* Nb. Lambertian + Specular – Nb. Hapke + Specular – Nb. Precomputed Phase Functions for horizontal
opaque surfaces – Nb. Precomputed Leaf Phase Functions *
0 0 0 0

* Lambertian + Specular.
Parameters : 0/1 - name - rho - A - alpha – refraction index – mean reflectance – mean specular reflectance *

* Hapke + Specular
Parameters : 0/1 - Name - albedo - B0 - b1 - b2 - c1 - c2 - h - A - alpha – refraction index – mean reflectance –
mean specular reflectance *

* Precomputed Phase Function for horizontal opaque surfaces
Parameters : 0/1 - filename- number of parameters
( if number of parameters is 4 (Lambertan + Specular) )
        - rho - A - alpha – refraction index – mean reflectance – mean specular reflectance
 (if number of parameters is 10 (Hapke + Specular) ) :
        - albedo - B0 - b1 - b2 - c1 - c2 - h - A - alpha – refraction index – mean reflectance – mean specular
        reflectance *

* Precomputed Leaf Phase Functions.
Parameters : 0/1 - filename - LAD – foliar dimension – upper reflectance – lower reflectance - transmitance –
lower refraction index – upper refraction index – lower type of rusogity – lower Ko - (lower rugosity ) – upper
type of rugosity – upper Ko - (rugosity sup.) – mean reflectance – mean specular reflectance *
```

*Figure I.28 : Format du fichier coeff_scat.src. L'indice 0/1 au début de chaque ensemble de paramètres indique si le calcul (réflectance moyenne et/ou fonction de transfert, selon le cas) a été déjà effectué.*

L'interface DARTI a été développée avec des librairies adaptées au langage C : *Lesstif* (*http://www.lesstif.org*) pour les fenêtres de l'interface et *Mesa GL*

(*http://www.mesa3d.org*) pour la visualisation 3D et 2D de figures. Ces librairies sont les équivalents respectifs *freeware* des librairies *Motif* et *Open GL*.

*Figure I.29 : Fenêtre de démarrage de DARTI.*

La fenêtre principale de l'IHM (*Figure I.29*) comprend plusieurs menus déroulants chargés de faciliter l'emploi de DART et l'entrée des paramètres nécessaires :

- Menu *"Application"* : Arrêt de l'exécution de DARTI.
- Menu *"Parameters"* : Entrée de tous les paramètres du modèle. Il comprend 3 options ("DIRECTIONS", "RT_DART" et "MAKET & PHASE") associées à chaque module de calcul.
  L'option "DIRECTIONS" permet de définir les directions qui discrétisent l'espace 4π. Ces dernières incluent la direction solaire et un sur-échantillonnage optionnel autour de la direction du *hot-spot*, etc.
  L'option "RT_DART" spécifie les paramètres de la simulation du transfert radiatif parmi lesquels les produits de sortie, la configuration d'observation et les caractéristiques de l'atmosphère.
  L'option "Maket & Phase" permet de définir tous les paramètres pour créer la maquette et pour calculer toutes les fonctions de transfert nécessaires au fonctionnement de DART. Elle ouvre un sous-menu avec des options spécifiques pour chaque type d'élément : sol, sous-bois, couvert arboré, zones urbaines et surfaces d'eau.
  Finalement, l'option du menu "Save all parameters" lance la création des fichiers (batch et données) des différents modules de DART. L'option "Load" charge dans DARTI les paramètres sauvegardés lors d'une session précédente.

- Menu *"Run"* : Lancement séquentiel des modules DIRECTIONS, PHASE, MAKET et RT_DART.
- Menu *"View"* : Outils de visualisation graphique de la maquette, des images et de différents produits de la simulation.

Les fenêtres de saisie (*Figure I.30*) permettent d'entrer les différents paramètres à l'aide de champs à remplir, de choix de menus déroulants, de cases à cocher et de boutons à sélectionner pour ouvrir d'autres sous-fenêtres. Certaines entrées peuvent être activées ou désactivées selon les choix effectués dans cette fenêtre ou dans d'autres fenêtres. Des valeurs d'entrée par défaut sont souvent proposées pour aider l'utilisateur.

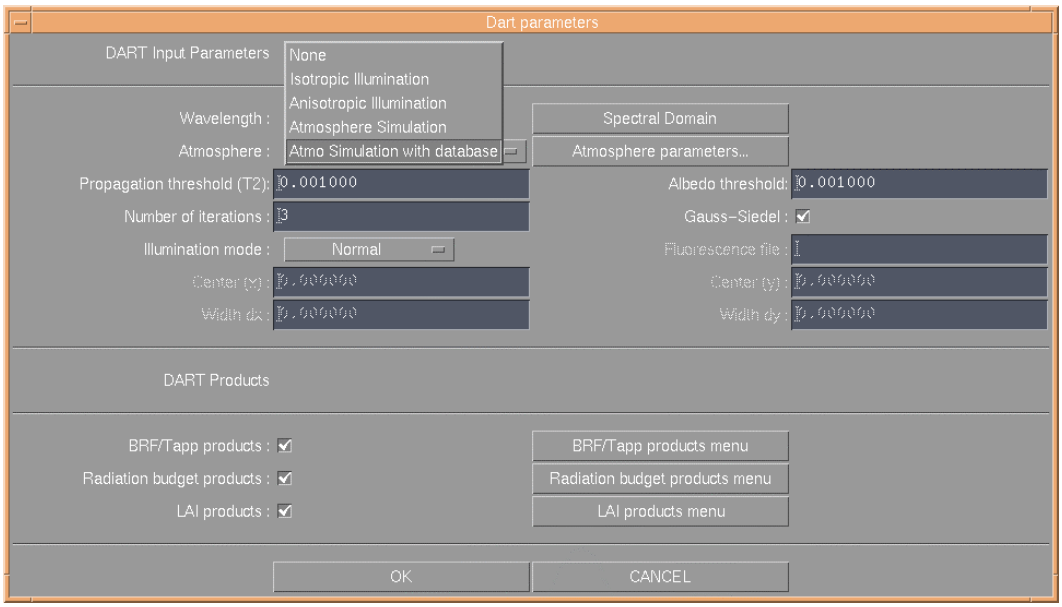



*Figure I.30 : Fenêtre de saisie de paramètres de DARTI.*

SAISIE

Ce module permet de saisir en mode texte (sans interface graphique) les paramètres du modèle DART. Contrairement au module DARTI, il ne permet pas de lancer les modules de calcul, ni de visualiser les résultats du modèle. Ainsi, après la saisie et la sauvegarde des paramètres, les modules de calcul (DIRECTION, PHASE, MAKET et RT_DART) doivent être exécutés individuellement en utilisant les fichiers batch associés.

DIRECTION

Ce module crée les $N_{dir}$ directions de propagation du rayonnement avec ou sans sur-échantillonnage. Les plans principaux et le secteur angulaire autour de la direction du *hot-spot* peuvent ainsi être sur-échantillonnés. Le module DIRECTION stocke tous les angles ($\theta$, $\varphi$, $\Delta\Omega$) dans le fichier *directions.dir*.

MAKET

Ce module génère la maquette informatique du paysage terrestre à partir des paramètres d'entrée spécifiés par l'opérateur. Il crée deux fichiers :

- Le fichier *mak* qui contient la description de chaque cellule de la matrice tridimensionnelle constituant le paysage terrestre (*Tableau I.4).*
- Le fichier *figures.src (*Tableau I.5*)* qui décrit les caractéristiques géométriques des figures opaques (*cf. § II.2*).

| | **Indice** (int) | **Argument C1** | **Argument C2** | **Argument C3** | **Argument C4** | **Argument C5** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ***Vide*** | 0 | / | / | / | / | / |
| ***Air*** | 1 | Coefficient d'extinction par diffusion des gaz (*unsigned int*) | Coefficient d'extinction par diffusion des aérosols (*unsigned int*) | Coefficient d'extinction par absorption des gaz (*float*) | Coefficient d'extinction par absorption des aérosols (*float*) | / |
| ***Sol*** | 2 | Type de diffuseur (0,1,2 ou 3) (*unsigned int*) | Facteur de réflectance (x65000) si C1=0 ou indice dans *coeff_scat.src* pour le type C1 (*unsigned int*) | / | / | / |
| ***Eau*** | 3 | | | | | |
| ***Route*** | 4 | | | | | |
| ***Sol_MNT*** | 7 | Type de diffuseur (0,1,2 ou 3) (*unsigned int*) | Facteur de réflectance (x65000) si C1=0 ou indice dans *coeff_scat.src* pour le type C1 (*unsigned int*) | Configuration (0/1) (*int*) | / | / |
| ***Eau_MNT*** | 8 | | | | | |
| ***Route_MNT*** | 9 | | | | | |
| ***Herbe*** | 5 | $LAI_{cell}$ (multiplié par 1000) (*unsigned int*) | N° de la fonction de phase dans *coeff_scat.src* (*unsigned int*) | / | / | / |
| ***Houppier*** | 6 | | | | | |
| ***Mur*** | 10 | *Nb Figures (int)* | *N° Figure 1* (*int*) | N° Figure 2 (*int*) | N° Figure 3 (*int*) | N° Figure 4 etc. |
| ***Tronc*** | 11 | | | | | |
| ***Toit*** | 12 | | | | | |

*Tableau I.4 : Structure des différents types de cellules du fichier mak. Les indices C1 et C2 renseignent sur les propriétés optiques des cellules Sol, Eau, Route et Air et les propriétés optiques et géométriques des cellules Sol_MNT, Eau_MNT, Route_MNT, Herbe et Feuille. Les cellules Mur, Tronc et Toit contiennent le nombre de figures qui traversent la cellule, ainsi que des indices (n° figure) qui référencent les figures stockées dans le fichier figures.src.*

| | Triangle ou parallélogramme | 3 points + vecteur normal | Propriétés optiques | |
|---|---|---|---|---|
| Ligne du fichier | 0 ou 1 (int) | 12 (float) | C1 (int) | C2 (int) |

*Tableau I.5 : Ligne du fichier (figure.src) qui stocke les figures géométriques. La première ligne du fichier contient le nombre total de figures.*

PHASE

Ce module pré-calcule les fonctions de transfert de la végétation et des surfaces opaques. Ainsi, il génère les fichiers *scat_file.ft, trans_file.ft* et *spec_file.ft, pol_file.ft* qui contiennent respectivement les fonctions de transfert (*cf.* § II.1) de diffusion ($T_d(j,\Omega_s,\Omega_v)$), de transmission ($T(j,\Omega_s)$), de diffusion spéculaire ($T_{spec}(j,\Omega_s,\Omega_v)$) et de diffusion polarisée ($T_{pol}(j,\Omega_s,\Omega_v)$). De plus, PHASE peut aussi calculer les propriétés optiques de l'atmosphère pour un ensemble de configurations pré-définies (*cf.* § III.2.2).

RT_DART

Ce module effectue divers pré-calculs (calcul des trajets des rayons, distances entre les sous-centres des cellules et les bords, etc.), puis effectue le suivi de rayons à l'intérieur du système paysage-atmosphère.

## I.7 Conclusion

Le modèle DART propose une résolution discrète des équations du transfert radiatif permettant d'obtenir des images de télédétection d'un capteur situé à une altitude quelconque, à toute résolution spatiale et pour tout type de paysage terrestre. Une des originalités du modèle est l'intégration de la modélisation du transfert radiatif dans un paysage architecturalement complexe avec celui dans l'atmosphère.

La combinaison de figures géométriques opaques et de cellules de végétation "turbides" permet d'inclure dans la maquette des éléments urbains (bâtiments, murets et routes) et naturels (arbres et herbe). D'autre part, le modèle permet d'importer une description architecturale du paysage réalisée avec un autre logiciel.

La décomposition de l'atmosphère en 3 couches avec des cellules de taille différente, permet de considérer, à la fois, l'hétérogénéité spatiale de l'éclairement rétrodiffusé par l'atmosphère et l'air contenu dans le paysage. La description précise de l'atmosphère est donnée ultérieurement dans le *Chapitre III*.

D'un point de vue de l'utilisation du modèle, un effort important a été consacré au développement d'une interface homme-machine (IHM) conviviale et qui permette l'utilisation de DART par des opérateurs non familiarisés avec des concepts du transfert radiatif.

Concernant les limites du modèle DART, deux facteurs principaux contraignent les dimensions de la maquette en nombre de cellules : (1) les temps de calcul, qui augmentent avec le nombre de cellules à traiter et surtout avec le nombre de cellules

"turbides" ; et (2) la mémoire vive du calculateur, qui est utilisée pour le stockage de la description du paysage.

D'autre part, le modèle est limité par le fait qu'il ne prend pas en compte des cellules qui combinent des éléments "opaques" et "turbides". Ceci implique la nécessité de diminuer les dimensions des cellules pour traiter des milieux mixtes. Ceci conduit à une augmentation des dimensions de la maquette en nombre de cellules qui peut être confrontée aux limites exposées dans le paragraphe précédent.

# II MODÉLISATION DU TRANSFERT RADIATIF DANS LE PAYSAGE

Ce chapitre présente les améliorations introduites au niveau de la modélisation du transfert radiatif à l'intérieur des cellules "turbides" de végétation et des cellules "opaques" qui constituent le paysage terrestre (*cf.* § I.2). Dans le cas des cellules "turbides" de végétation, la modélisation de DART version 1996 a été testée et améliorée. Pour ce qui est des cellules "opaques", une nouvelle approche basée sur la triangularisation des surfaces a été adoptée.

## II.1 Modélisation du transfert radiatif de la végétation

La version de 1996 du modèle DART a été conçue pour simuler avec précision le transfert radiatif au sein des paysages naturels hétérogènes. Sa précision a déjà été évaluée avec succès avec des mesures terrain (Gastellu-Etchegorry et al., 1999). Cependant, cette évaluation est limitée par la précision des mesures terrain. Ceci explique l'intérêt d'études conduites pour comparer DART à d'autres modèles. En particulier, cette comparaison a été réalisée pour des paysages naturels constitués de végétation et un sol plat dans le cadre de l'expérience RAMI (RAdiation transfer Model Intercomparison) (Pinty *et al.*, 2001). Cette expérience a mis en évidence certaines divergences entre DART et d'autres modèles notamment dans le proche infrarouge. Ce pourquoi, des modifications ont été apportées sur certaines approximations utilisées sur la modélisation des mécanismes de diffusion à l'intérieur des cellules de feuillage.

Après une description des caractéristiques des cellules de feuillage, les points suivants présentent les tests effectués et les améliorations apportées.

### II.1.1 Caractéristiques des cellules de feuillage

La modélisation de la propagation des rayons dans les cellules de feuillage (*Houppier* et *Herbe*) est relativement complexe. En effet, ces cellules correspondent à des milieux "turbides" et donnent lieu à des diffusions volumiques et non simplement des diffusions de surface comme les cellules "opaques". Le traitement particulier des cellules "turbides" de végétation est décrit ci-dessous.

Caractérisation des cellules de végétation

Les caractéristiques optiques d'une feuille sont modélisées par une fonction de diffusion $f(j,\Omega_s \rightarrow \Omega_v,\Omega_f)$ qui donne la fraction du rayonnement incident dans la direction $\Omega_s$ qui est diffusé vers $\Omega_v$ par unité d'angle solide et pour une feuille d'une espèce (j) dont le vecteur $\Omega_f$ est normal à sa surface.

La fonction $f(j,\Omega_s \rightarrow \Omega_v,\Omega_f)$ est la somme d'une composante lambertienne $f_d(j,\Omega_s \rightarrow \Omega_v,\Omega_f)$ et d'une composante spéculaire $f_s(j,\Omega_s \rightarrow \Omega_v,\Omega_f)$ (Grant et al., 1987 ; Breece et Holmes, 1971 ; Woolley 1971) (*Figure II.1*). La composante lambertienne est associée à la diffusion volumique du rayonnement qui pénètre la feuille. La composante spéculaire est associée à la diffusion de surface qui est réfléchie de manière spéculaire par la cuticule de la feuille.

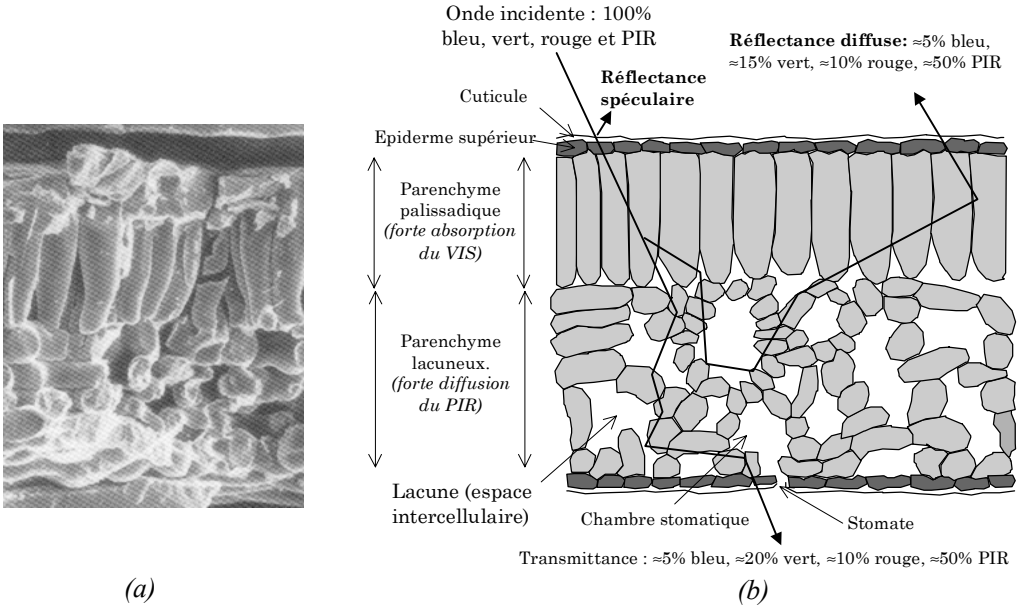



*Figure II.1 : Structure de tissu foliaire. (a) Coupe de feuille d'érable rouge (Brakke et al., 1993). (b) Coupe schématique de dicotylédone et interactions électromagnétiques associées.*

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

$$f_d(j,\Omega_s \rightarrow \Omega_v , \Omega_f) = \begin{cases} \frac{1}{\pi}.\rho_f(\Psi_{fs}).|\Omega_f.\Omega_v| & (\Omega_s.\Omega_f).(\Omega_f.\Omega_v) < 0 \\ \frac{1}{\pi}.\tau_f(\Psi_{fs}).|\Omega_f.\Omega_v| & (\Omega_s.\Omega_f).(\Omega_f.\Omega_v) > 0 \end{cases} \quad (2.\ 1)$$

où $$\int_{4\pi} f_d(j,\Omega_s \rightarrow \Omega_v , \Omega_f).d\Omega_v = \rho_f(\Psi_{fs}) + \tau_f(\Psi_{fs}) \quad (2.\ 2)$$

Ce modèle permet de distinguer la réflectance de la face supérieure ($\rho_{fsup}$) et inférieure des feuilles ($\rho_{finf}$).

D'après Vanderbilt *et al.* (1991), la fonction de phase spéculaire dépend de trois paramètres : l'angle entre la direction incidente et de sortie ($\Psi_{sv}$), l'indice de réfraction de la surface foliaire ($n_{fj} \approx 1.5$) et le facteur de correction $K_{fj}(\Psi_{fs})$ (Nilson, 1991) du flux spéculaire (entre 0 pour une surface lisse et 1 pour une surface rugueuse).La composante spéculaire s'écrit :

$$f_s(j, \Omega_s \rightarrow \Omega_v, \Omega_s) = K_{fj}(\Psi_{fs}).R_s^2(n_{fj}, \Psi_{fs}).\delta(\Omega_s , \Omega_v^*) \quad (2.3)$$

où $\delta(\Omega_s , \Omega_v^*)$ est une fonction de Dirac et $\Omega_v^*$ est la direction spéculaire du rayonnement incident. $R_s^2(n_j, \Psi_{fs})$ est le carré du coefficient de réflectance spéculaire moyen de Fresnel.

Le vecteur normal à la surface de la feuille $\Omega_f$ est caractérisé par une fonction de distribution angulaire foliaire $\frac{g_f(j,\Omega_f)}{2\pi}$ , appelée en anglais LAD (*Leaf Angular Distribution*) (Nilson, 1968). La fonction $\frac{g_f(j,\Omega_f)}{2\pi}$ donne la probabilité que le vecteur normal à une feuille soit orienté vers la direction $\Omega_f$ . Le modèle inclut 6 LAD prédéfinis : sphérique, uniforme, éréctophile, planophile, extremophile et plagiophile (*Figure II.2*).

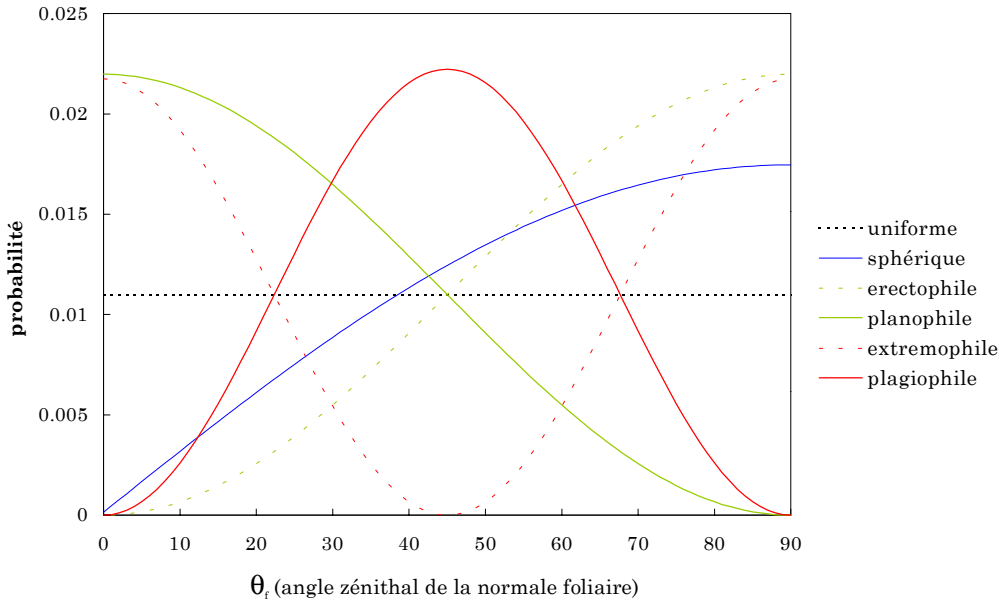



*Figure II.2 : LAD prédéfinis dans le modèle DART.*

La fonction de phase ($\frac{P(\Omega_s,\Omega_v)}{4\pi}$) d'un volume de feuillage est :

$$\frac{P(\Omega_s,\Omega_v)}{4\pi} = \frac{\int_{2\pi} \frac{g_f(j,\Omega_f)}{2\pi}. |\Omega_s.\Omega_f| .f(j,\Omega_f,\Omega_s\rightarrow\Omega_v).d\Omega_f}{G(j,\Omega_s)} \quad (2.4)$$

$$\text{où} \qquad G(j,\Omega_s) = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} d\Omega_f \int_0^1 g_f(i,\Omega_f). |\Omega_s.\Omega_f| .d\mu_f \quad (2.5)$$

$G(j,\Omega_s)$ est un facteur géométrique qui indique la projection moyenne d'une surface unité d'éléments foliaires sur un plan perpendiculaire à la direction $\Omega_s$ .

La fonction de phase définit la fonction de transfert diffuse $T_d(j,\Omega_s,\Omega_v)$ qui est une intégration de la fonction de phase $P(j,\Omega_s,\Omega_v)$ sur des angles solides discrets.

$$T_d(j,\Omega_s,\Omega_v) = \int_{\Delta\Omega_v} \frac{P(j,\Omega_s,\Omega_v)}{4\pi}.d\Omega_v \quad (2.\ 6)$$

La quantité de feuillage présente dans une cellule (i) est définie par la densité volumique foliaire $u_f(i)$ mesurée en $m^{-1}$ et qui représente la surface foliaire par unité de volume. L'intégration verticale de $u_f$ donne l'indice foliaire LAI (*Leaf Area Index*) ou mètres carrés de feuillage par unité de surface horizontale.

La fonction de transmittance $T(j,\Omega_s)$ (Ross, 1975) est définie par :

$$T(j,\Omega_s) = \exp[-G(j,\Omega_s)] \quad (2.\ 7)$$

En résumant, les propriétés optiques d'une cellule "turbide" de feuillage (i) de type (j) sont caractérisées dans le modèle par une densité volumique foliaire $u_f(i)$, une fonction de transfert diffuse ($T_d(j,\Omega_s,\Omega_v)$) et une fonction de transmittance unitaire ($T(j,\Omega_s)$) ($\Omega_s$ et $\Omega_v$ sont respectivement la direction d'entrée et de sortie). Ces deux dernières fonctions sont définies par le LAD, la réflectance foliaire supérieure ($\rho_{fsup}$), la réflectance foliaire inférieure ($\rho_{finf}$), la transmitance foliaire ($\tau_f$), l'indice de réfraction inférieur ($n_{finf}$), l'indice de refraction supérieur ($n_{fsup}$) et les paramètres spéculaires ($K_{finf}$ et $K_{fsup}$).

### II.1.2 Mécanismes d'interaction onde-matière

L'énergie interceptée $W_{int}(i,\Omega_s)$, dans le cas d'un rayonnement incident selon la direction $\Omega_s$, (*Figure II.3*) induit une énergie diffusée selon le secteur ($\Omega_v$,$\Delta\Omega_v$) égale à :

$$W_{diff}(i,\Omega_s,\Omega_v) = T_d(j,\Omega_s,\Omega_v).W_{int}(i,\Omega_s) \quad \text{où} \quad W_{int}(\Delta l_i,\Omega_s) = W_{in}(\Omega_s).[1 - T(\Delta l_i,\Omega_s)] \quad (2.\ 8)$$

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

$$W_{trans}(\Delta l_i,\Omega_s) = T(\Delta l_i,\Omega_s).W_{in}(\Omega_s) \quad (2.\ 9)$$

$$\text{avec} \quad T(\Delta l_i,\Omega_s) = [T(j,\Omega_s)]^{\,u_f(i).\Delta l_i} \quad \text{où} \quad T(j,\Omega_s) = \exp[-G(j,\Omega_s)] \quad (2.\ 10)$$

où la transmittance d'un trajet $T(\Delta l_i,\Omega_n)$ est calculée à partir du LAD, de la direction du rayonnement incident $\Omega_s$ sur la cellule, de la longueur du trajet de traversée du rayon ($\Delta l_i$) et de la densité volumique des feuilles $u_f(i)$ (*Figure II.3*).

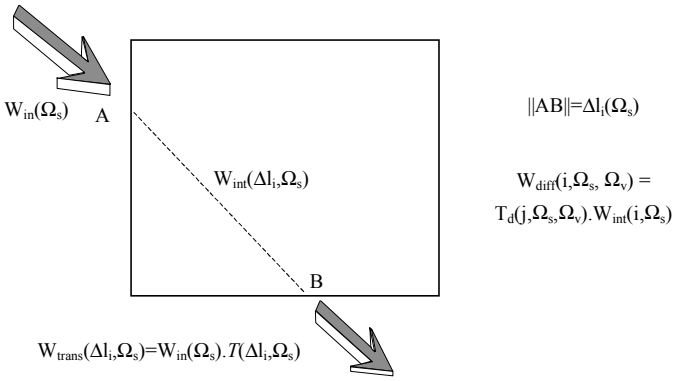



*Figure II.3 : Schéma du rayonnement intercepté à l'intérieur d'une cellule de feuillage.*

Interaction à l'itération k=1

Dans le cas d'un vecteur source $W_{in}(0,\Omega_s)$ incident sur une cellule (i) de type *Houppier* ou *Herbe* selon une direction $\Omega_s$ (*Figure II.4*), le rayonnement diffusé à l'intérieur de la cellule ($W_1(\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v)$) selon une direction de diffusion $\Omega_v$ s'écrit :

$$W_1(\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v) = W_{int}(\Delta l_i,\Omega_s).T_d(j,\Omega_s,\Omega_v) \quad (2.11)$$

$$\text{où} \quad W_{int}(\Delta l_i,\Omega_s) = W_{in}(\Omega_s).[1 - T(\Delta l_i,\Omega_s)] \quad (2.12)$$

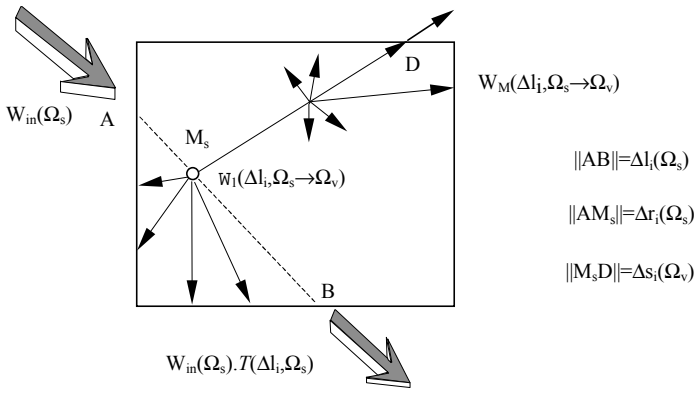



*Figure II.4 : Schéma des diffusions à l'intérieur d'une cellule de type Houppier ou Herbe.*

Le flux $W_1(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$ n'est pas celui qui sort de la cellule car celui-ci est en partie atténué et re-diffusé par les éléments foliaires avant de sortir de la cellule.

Dans la version initiale du modèle DART (version 1996), l'ensemble des diffusions dues à la propagation du flux incident le long du trajet $\Delta l_i$ à l'intérieur de la cellule est modélisé comme une diffusion provenant d'un seul point ($M_s$), qualifié de "point milieu" ou "barycentre énergétique", situé sur le trajet $\Delta l_i$. Sa distance $\Delta r_i$ à partir du point d'entrée de la cellule (i) (A dans la *Figure II.4*) est calculée comme étant la distance pour laquelle la puissance diffusée avant ce point sur la distance [0 $\Delta r_i$] est égale à la puissance diffusée après ce point, sur la distance [$\Delta r_i$ $\Delta l_i$] :

$$W_{int}(\Delta r_i,\Omega_s) = \frac{1}{2}.\, W_{int}(\Delta l_i,\Omega_s) \tag{2.13}$$

Par suite, la distance $\Delta r_i$ est :

$$\Delta r_i = \frac{\ln 2 - \ln[1+\exp(-u_f(i).G(j,\Omega_s).\Delta l_i])}{u_f(i).G(j,\Omega_s)} \tag{2.14}$$

En appelant $\Delta s_i(\Omega_v)$ la longueur de propagation depuis un barycentre du rayon diffusé selon la direction $\Omega_v$ , il apparaît que la puissance diffusée selon $\Omega_v$ par la cellule (i) est:

$$W_1(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v) = W_1(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)\ .\ \exp[-G(j,\Omega_v).u_f(i).\Delta s_i(\Omega_v)] \tag{2.15}$$

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

$$W_1(\Delta l_i,\Omega_s) = \int_{4\pi} W_1(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v).\exp[-G(j,\Omega_v).u_f(i).\Delta s_i(\Omega_v)].d\Omega_v \tag{2.16}$$

L'approximation du "barycentre énergétique" a été mise en cause dans le cadre des études pour l'amélioration du modèle conduites dans cette thèse. Les conclusions de cette étude et les améliorations apportées sont présentées dans les points *II.1.5* à *II.1.7* de ce manuscrit.

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

$$W_{1,int}(\Delta l_i,\Omega_s) = \sum_{v=1}^{Ndir} [W_1(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v) - W_1(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)] \tag{2. 17}$$

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

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

$$\Rightarrow W_M(\Delta l_i,\Omega_s) \approx [\frac{\omega_j.<T_i>}{1 - \omega_j.[1 - <T_i>]}].W_{1,int}(\Delta l_i,\Omega_s) \quad (2.\ 18)$$

$\omega_j$ est le coefficient moyen de diffusion pour le rayonnement diffus, dans la cellule (i) de type d'espèce (j). Si le coefficient de diffusion des éléments de la cellule i est bi-lambertien, avec pour réflectance et transmittance hémisphérique $\rho_j$ et $\tau_j$ alors : $\omega_j = \rho_{dj} + \tau_{dj}$. Le terme $<T_i>$ est la moyenne des transmittances $T(\Delta s_i,\Omega_v)$, où $v \in [1\ N]$, entre le centre et les faces de la cellule (i).

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

$$W_M(\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v) = W_M(\Delta l_i,\Omega_s) . \frac{\exp[-G(j,\Omega_v).u_f(i).\Delta s_i(\Omega_v)]. \sum_{s=1}^{Ndir} \int_{2\pi} |\Omega_s.\Omega_f| . \frac{g_f(j,\Omega_f)}{2\pi}.f_j(\Omega_s \rightarrow \Omega_v,\Omega_f).d\Omega_f.\Delta\Omega_s.\Delta\Omega_v}{\sum_{v=1}^{Ndir} \exp[-G(j,\Omega_v).u_f(i).\Delta s_i(\Omega_v)]. \sum_{s=1}^{Ndir} \int_{2\pi} |\Omega_s.\Omega_f| . \frac{g_f(j,\Omega_f)}{2\pi}.f_j(\Omega_s \rightarrow \Omega_v,\Omega_f).d\Omega_f.\Delta\Omega_s.\Delta\Omega_v} \quad (2.\ 19)$$

En utilisant le terme $TG(j,\Omega_v) = \sum_{s=1}^{Ndir} T_d(j,\Omega_s,\Omega_v).\ln[T(j,\Omega_s)].\Delta\Omega_s$ on a :

$$W_M(\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v) = W_M(\Delta l_i,\Omega_s) . \frac{T(\Delta s_i,\Omega_v).TG(j,\Omega_v)}{\sum_{v=1}^{Ndir} T(\Delta s_i,\Omega_v).TG(j,\Omega_v)] } \quad (2.\ 20)$$

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

$$W(\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v) = W_1(\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v) + W_M(\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v) \quad (2.\ 21)$$

En fait, chaque cellule peut être éclairée par N différents rayons se propageant selon la même direction $\Omega_s$ . La puissance diffusée totale $W(i,\Omega_v)$ issue d'une cellule (i) est donc :

$$W(i,\Omega_v) = \sum_{n=1}^{N} W(\Delta l_i(n),\Omega_s(n) \rightarrow \Omega_v) \quad \text{avec} \quad n \in [1\ \ N] \quad (2.\ 22)$$

D'autre part, la prise en compte du phénomène de rétrodiffusion ou *hot-spot* à l'intérieur d'une cellule repose sur l'approche de Kuusk (1985) qui applique un coefficient d'extinction ($\alpha_a$) (fonction de la dimension des feuilles $s_f$ ) au flux diffusé d'ordre 1 $W_1(\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v)$.

Interaction à l'itérations k>1

Pendant l'illumination solaire directe, le seul stockage de l'énergie interceptée par les cellules et du point milieu permet de calculer au cours de l'itération suivante (k=1) l'énergie diffusée par chaque cellule. En effet, la direction d'illumination solaire est unique et connue. Ce n'est pas le cas pour les itérations ultérieures. C'est pourquoi, la connaissance de l'énergie interceptée n'indique pas la provenance de l'énergie incidente. La diffusion ne peut alors pas être calculée de manière exacte. La version 1996 du modèle DART considérait comme approximation, pour les itérations k>1, que le rayonnement incident intercepté était isotrope. Le point milieu moyen d'une cellule est un simple barycentre énergétique calculé de manière itérative au fur et à mesure que des rayons interceptent cette cellule. Soient $W_{int}(m,k,i)$ et $M_s(m,k,i)$ respectivement l'énergie interceptée et le point milieu moyen de la cellule (i) calculés lors de l'itération (k) au bout de m interceptions avec des rayons incidents de directions quelconques. Appelons $(x_{m,k,i},y_{m,k,i},z_{m,k,i})$ les coordonnées de $M_s(m,k,i)$. L'interception par la cellule i d'un (m+1) ème rayon lors de l'itération (k) donne une énergie interceptée $W_{int}$ et un point milieu $M_s(x,y,z)$. Par suite l'énergie totale interceptée s'écrit :

$$W_{int}(m+1,k,i) = W_{int}(m,k,i) + W_{int} \qquad (2.\ 23)$$

et les coordonnées du nouveau point milieu :

$$x_{m+1,k,i}=\frac{x_{mki}.W_{int}(m,k,i)+x.W_{int}}{W_{int}(m,k,i)+W_{int}},\ y_{m+1,k,i}=\frac{y_{mki}.W_{int}(m,k,i)+y.W_{int}}{W_{int}(m,k,i)+W_{int}},\ z_{m+1,k,i}=\frac{z_{mki}.W_{int}(m,k,i)+z.W_{int}}{W_{int}(m,k,i)+W_{int}} \qquad (2.\ 24)$$

Au cours de l'itération (k), l'énergie diffusée par chaque cellule est calculée à partir de l'information stockée par la cellule. Tout d'abord, l'énergie $W_1(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)$ diffusée dans la cellule est déterminée à partir de la connaissance du barycentre $M_s$ et de l'énergie interceptée par la cellule. Ainsi, nous avons :

$$W_1(\Omega_v) = <T_d(j,\Omega_s,\Omega_v)>_{\Omega_s}.W_{int}(\Omega_s) \qquad (2.\ 25)$$

où $<T(\Omega_s\Omega_v)>_{\Omega_s}$ est la fonction de phase moyenne de la cellule selon la direction $\Omega_v$ :

$$<T(j,\Omega_s,\Omega_v)>_{\Omega_s} = \frac{1}{2\pi}.\sum_{s=1}^{Ndir} G(j,\Omega_s).T_d(j,\Omega_s,\Omega_v).\Delta\Omega_s \qquad (2.\ 26)$$

La puissance totale d'ordre 1 sortant de la cellule s'écrit :

$$W_1(i,\Omega_v) = \int_{4\pi} w_1(\Omega_v).\exp[-G(i,\Omega_v).u_f(i).\Delta s_i(\Omega_v)].d\Omega_v \qquad (2.\ 27)$$

La diffusion multiple $W_M(i,\Omega_v)$ est ensuite calculée de la même manière que pour l'itération 1. La diffusion totale est donc :

$$W(i,\Omega_v) = W_1(i,\Omega_v) + W_M(i,\Omega_v) \qquad (2.\ 28)$$

L'hypothèse d'isotropie du rayonnement incident intercepté a été également mise en cause et améliorée dans le cadre de cette Thèse (*cf.* § II.1.4).

### II.1.3 Paysages de référence pour les études d'amélioration

Les améliorations du transfert radiatif apportées aux cellules de feuillage sont testées sur les deux types de paysage suivants :

Couvert végétal turbide et homogène

Un premier paysage est constitué d'une couche foliaire turbide au-dessus d'une surface lambertienne de réflectance nulle. Les feuilles sont caractérisées par leurs propriétés optiques ($\rho_f$ et $\tau_f$) et structurales (LAI et LAD). Les simulations ont été conduites dans les domaines spectraux du visible (VIS) et du proche infrarouge (PIR). Le *Tableau II.1* résume les différentes configurations qui ont été considérées. La *Figure II.5* présente la maquette DART qui génère la couche infinie par répétition de ce motif de base.

| **Paramètre** | **Valeur** | |
|---|---|---|
| LAI | 1, 2 et 4 | |
| LAD | sphérique, érectophile et planophile | |
| Réflectance ($\rho_f$) et transmittance ($\tau_f$) des feuilles | VIS | ($\rho_f$ , $\tau_f$)=(5%,5%) et ($\rho_f$ , $\tau_f$)=(5%,0%) |
| | PIR | ($\rho_f$ , $\tau_f$)=(45%,45%) et ($\rho_f$ , $\tau_f$)=(45%,0%) |
| Réflectance du sol ($\rho_{sol}$) | 0 % | |
| Zénith solaire ($\theta_s$) | 20° et 50° | |

*Tableau II.1 : Paramètres de la maquette représentant une couche homogène.*

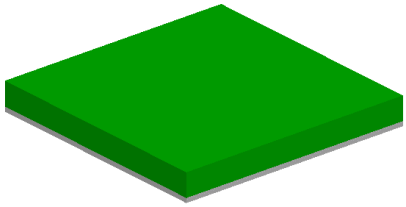


*Figure II.5 : Représentation graphique de la couche homogène de végétation.*

Couvert arboré

Un deuxième couvert est constitué d'arbres au-dessus d'une surface lambertienne de réflectance ($\rho_{sol}$). Les arbres ont une densité de 15 arbres/ha, une couronne de forme sphérique (diamètre = 20 m) et une hauteur moyenne (24.4 m). La *Figure II.6* donne une représentation graphique de ce couvert arboré.

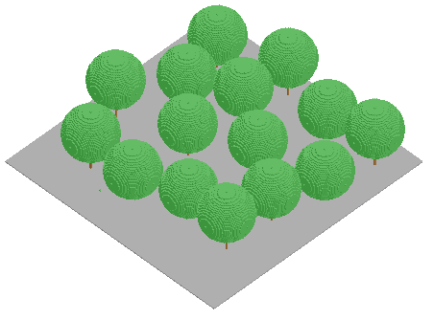


*Figure II.6 : Représentation graphique du couvert arboré.*

Le *Figure II.7* indique les principaux paramètres des configurations utilisées. Le *Tableau II.2* présente les 4 cas particuliers qui considérés par l'expérience RAMI.

| **Paramètre** | **Valeur** | |
|---|---|---|
| LAI | 5 (par arbre) | |
| LAD | sphérique | |
| Réflectance ($\rho_f$) et transmittance ($\tau_f$) des feuilles | VIS | ($\rho_f$ , $\tau_f$)=( 5.46%,1.49%) |
| | PIR | ($\rho_f$ , $\tau_f$)=( 49.57%,44.09%) |
| Réflectance du sol ($\rho_{sol}$) | VIS | 12.7 % |
| | PIR | 15.9 % |
| Zénith solaire ($\theta_s$) | 20° et 50° | |

*Figure II.7 : Paramètres de la scène représentant un couvert hétérogène. Le LAI par arbre est défini comme le rapport entre la surface foliaire de l'arbre et la surface projetée au sol de la couronne de l'arbre.*

| **Nom de la Configuration** | **Domaine Optique** | **Zénith Solaire** |
|---|---|---|
| HET01_DIS_UNI_RED_20 | visible (rouge) | 20° |
| HET01_DIS_UNI_NIR_20 | proche-infrarouge | 20° |
| HET01_DIS_UNI_RED_50 | visible (rouge) | 50° |
| HET01_DIS_UNI_NIR_50 | proche-infrarouge | 50° |

*Tableau II.2 : Nomenclature des configurations expérimentales de référence*

### II.1.4 Expérience d'intercomparaison de modèles RAMI

L'expérience RAMI a permis de comparer la version 1996 de DART avec trois autres modèles de paysages terrestres tridimensionnels (*Tableau II.3*) : *Flight* (North, 1996), *Sprint* (Thompson et Goel, 1998) et *Raytran* (Govaerts et Verstraete, 1998). De fortes similitudes ont été observées dans le domaine spectral du rouge, à la fois dans le plan solaire et le plan perpendiculaire (*Figure II.8*). Par contre, des différences notables ont été notées dans le proche infrarouge, pour presque toutes les directions d'observation.

| Modèle | Référence | Participants | Laboratoire |
|---|---|---|---|
| **Flight** | North, 1996 | North P. | Natural Environment Research Council, UK |
| **Sprint** | Thompson et Goel, 1998 | Thompson R. et Goel N. | Wayne State University, USA |
| **Raytran** | Govaerts et Verstraete, 1998 | Widlowski J.-L. | Joint Research Centre, Italie |

*Tableau II.3 : Modèles 3D participants à l'expérience RAMI.*

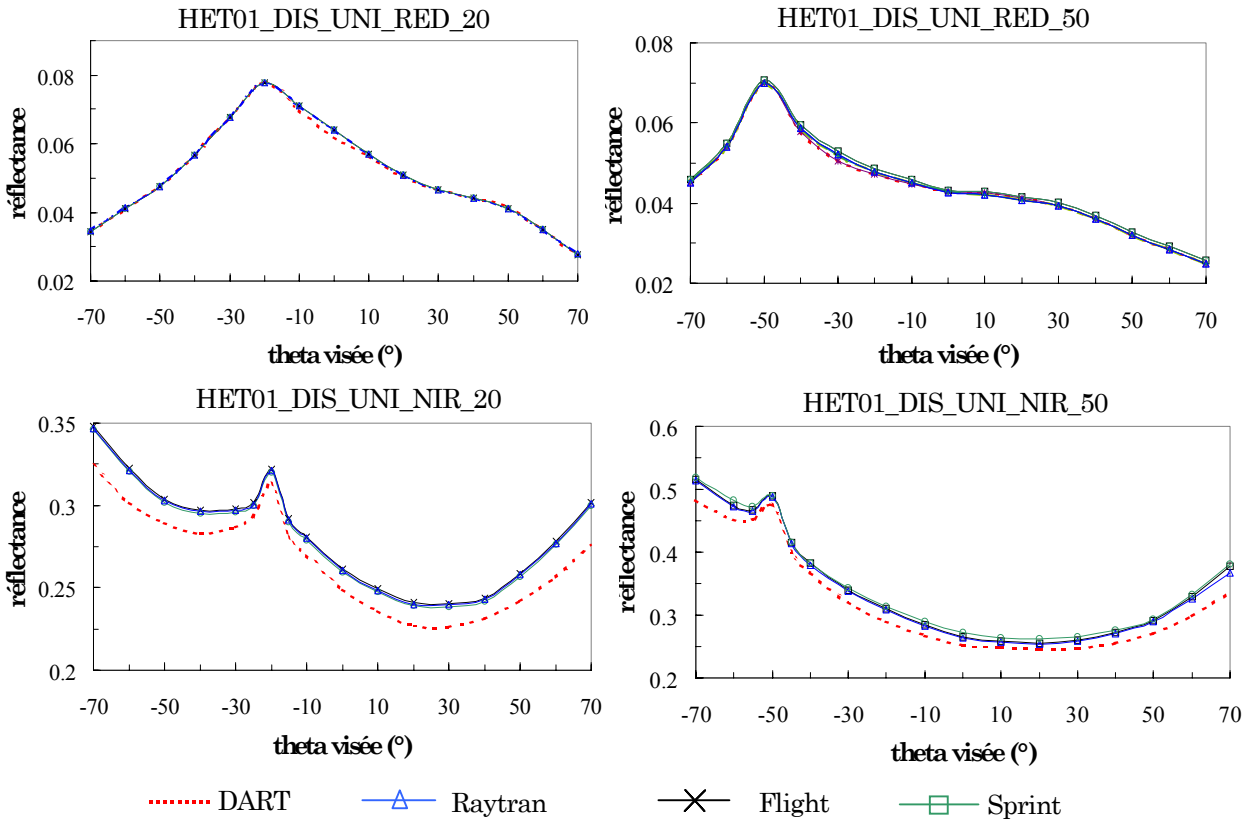



*Figure II.8 : Résultats des simulations des modèles 3D de l'expérience RAMI.*

L'écart relatif maximal entre DART et les autres modèles se produit pour la configuration HET01_DIS_UNI_NIR_20 et vaut 11.1%. Pour la configuration HET01_DIS_UNI_NIR_50 l'écart relatif maximal est de 9.6%.

Les différences observées dans le proche infrarouge ont conduit à s'interroger sur diverses approximations concernant le transfert radiatif dans les cellules de feuillage :

- Position du barycentre énergétique ($M_S$).
- Prise en compte de l'anisotropie du rayonnement intercepté à l'origine des diffusions aux itérations k>1.
- Position du point d'origine des rayons diffusés.

Ces différentes améliorations sont décrites dans les paragraphes suivants.

### II.1.5 Redéfinition de la position du barycentre énergétique

Le but de cette étude est d'évaluer l'erreur commise par l'approximation du barycentre énergétique (*cf.* § II.1.2) et éventuellement de proposer une alternative. Cette approximation consiste à considérer que la diffusion d'ordre 1 qui survient dans une cellule traversée par un rayon provient d'un point unique appelé "point milieu" ou "barycentre énergétique". Ce point se situe sur le trajet du rayon incident, au lieu où l'énergie interceptée entre le point d'entrée dans la cellule et ce point est égale à l'énergie interceptée entre ce point et la sortie de la cellule. Cette hypothèse simplificatrice joue un rôle fondamental dans le modèle DART. Il est donc intéressant d'évaluer l'erreur due à cette approximation. Cette expérience est réalisée en comparant l'expression analytique exacte du rayonnement d'ordre 1 ($W_1(\Omega_s \rightarrow \Omega_v)$) issu d'une couche turbide, à des simulations DART équivalentes (*Figure II.9*).

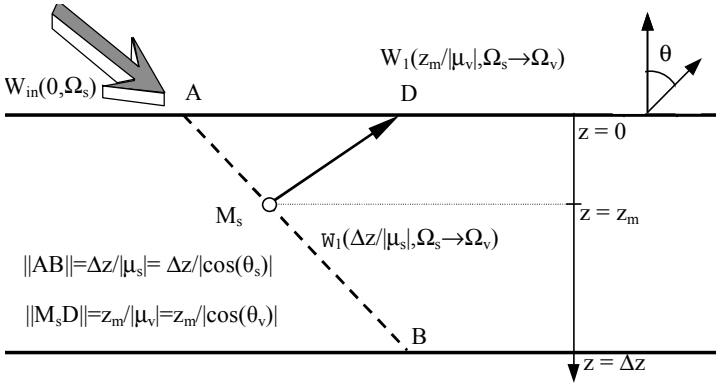



*Figure II.9 : Diffusion simple à l'itération d'ordre 1.*

L'approche adoptée est de considérer une couche turbide avec des propriétés structurales (hauteur $\Delta z$, LAD et LAI) et optiques ($\rho_f$ , $\tau_f$) bien définies (*Figure II.9*). La direction incidente est notée ($\Omega_s$) et la direction de diffusion ($\Omega_v$).

L'altitude ($z_m$) du barycentre énergétique associé à un rayon est définie comme l'altitude pour laquelle les énergies interceptées avant et après sont égales, soit :

$$\left[ \int_0^{z_m} G(\Omega_s).u_f.\exp[-G(\Omega_s).u_f.\frac{z}{|\mu_s|}].\frac{dz}{|\mu_s|} \right] = \left[ \int_{z_m}^{\Delta z} G(\Omega_s).u_f.\exp[-G(\Omega_s).u_f.\frac{z}{|\mu_s|}].\frac{dz}{|\mu_s|} \right] \quad (2.29)$$

$$z_{m\ barycentre} = -\frac{|\mu_s|}{u_f\ .G(\Omega_s)}.\ln[\frac{1+\exp[-G(\Omega_s).u_f.\frac{\Delta z}{|\mu_s|}]}{2}] \quad (2.30)$$

Pour les directions montantes (*i.e.*, $\theta_v < 90°$), l'énergie diffusée d'ordre 1 par unité de surface horizontale de la couche est :

$$W_{1\ exact}(\Delta z\ ,\ \Omega_s \rightarrow \Omega_v) = \int_0^{\Delta z} W_{in}(\Omega_s).T_d(\Omega_s\ ,\ \Omega_v).G(\Omega_s).u_f.\ \exp[-G(\Omega_s).u_f.\frac{z}{|\mu_s|}].\ \exp[-G(\Omega_v).u_f.\frac{z}{|\mu_v|}].\frac{dz}{|\mu_s|} \quad (2.31)$$

$$W_{1\ exact}(\Delta z,\Omega_s \rightarrow \Omega_v) = W_{in}(\Omega_s)\ .\ T_d(\Omega_s\ ,\ \Omega_v)\ .\frac{G(\Omega_s).|\mu_v|}{G(\Omega_v).|\mu_s|+G(\Omega_s).|\mu_v|}.[1-\exp[-u_f.\ \Delta z.\ (\frac{G(\Omega_s)}{|\mu_s|}+\frac{G(\Omega_v)}{|\mu_v|})]] \quad (2.32)$$

D'autre part, l'emploi de l'approximation du barycentre énergétique conduit à:

$$W_{1\ barycentre}(\Delta z\ ,\ \Omega_s \rightarrow \Omega_v)=\left[\int_0^{\Delta z} W_{in}(\Omega_s).T_d(\Omega_s\ ,\ \Omega_v).G(\Omega_s).u_f.\exp[-G(\Omega_s).u_f.\frac{z}{|\mu_s|}].\frac{dz}{|\mu_s|}\right]\ .\ \exp[-G(\Omega_v).u_f.\frac{z_m}{|\mu_v|}] \quad (2.33)$$

$$W_{1\ barycentre}(\Delta z\ ,\ \Omega_s \rightarrow \Omega_v) = W_{in}(\Omega_s).\left[1-\exp[-G(\Omega_s).u_f.\frac{\Delta z}{|\mu_s|}\right].T_d(\Omega_s\ ,\ \Omega_v).\exp[-G(\Omega_v).u_f.\frac{z_m}{|\mu_v|}] \quad (2.34)$$

Pour les directions d'observation descendantes ($\theta_v>90°$), avec $\theta_s \neq \theta_v$ :

$$W_{1\ exact}(\Delta z,\Omega_s \rightarrow \Omega_v) = W_{in}(\Omega_s).T_d(\Omega_s\ ,\ \Omega_v).\frac{G(\Omega_s).|\mu_v|.\exp[-u_f.\frac{G(\Omega_v)}{|\mu_v|}.\Delta z]}{-G(\Omega_v).|\mu_s|+G(\Omega_s).|\mu_v|}.\left[1\ -\ \exp[u_f.\ \Delta z.\ (\frac{G(\Omega_v)}{|\mu_v|}\ -\ \frac{G(\Omega_s)}{|\mu_s|}\ )]\right] \quad (2.35)$$

$$W_{1\ barycentre}(\Delta z\ ,\ \Omega_s \rightarrow \Omega_v) = W_{in}(\Omega_s).\left[1-\exp[-G(\Omega_s).u_f.\frac{\Delta z}{|\mu_s|}\right].T_d(\Omega_s\ ,\ \Omega_v).\exp[-G(\Omega_v).u_f.\frac{\Delta z-z_m}{|\mu_v|}] \quad (2.36)$$

Pour la direction solaire ($\theta_s=\theta_v$):

$$W_{1\ exact}(\Delta z,\Omega_s \rightarrow \Omega_v) = W_{in}(\Omega_s).T_d(\Omega_s\ ,\ \Omega_v).G(\Omega_v).\ u_f.\exp[-u_f.G(\Omega_s).\frac{\Delta z}{|\mu_s|}].\frac{\Delta z}{|\mu_s|} \quad (2.37)$$

$$W_{1\ barycentre}(\Delta z\ ,\ \Omega_s \rightarrow \Omega_v) = W_{in}(\Omega_s).\left[1-\exp[-G(\Omega_s).u_f.\frac{\Delta z}{|\mu_s|}\right].T_d(\Omega_s\ ,\ \Omega_v).\exp[-G(\Omega_s).u_f.\frac{\Delta z-z_m}{|\mu_s|}] \quad (2.38)$$

L'emploi du barycentre énergétique induit l'erreur relative ($\frac{W_{1\ barycentre} - W_{1\ exact}}{W_{1\ exact}}$) sur la diffusion d'ordre 1. Cette erreur, simplement appelée "erreur barycentre", dépend de quatre facteurs : la direction de diffusion ($\Omega_v$), la direction d'incidence ($\Omega_s$), le LAD et le LAI ($u_f.\Delta z$) des cellules. De plus, il faut noter qu'elle ne dépend pas de la fonction de transfert de diffusion $T_d(\Omega_s,\Omega_v)$ donc du secteur angulaire associé ($\Delta\Omega_v$).

La *Figure II.10* montre que l'erreur relative peut atteindre 3% pour une visée au nadir ($\theta_v$=0°) dans des configurations défavorables, c'est à dire avec des angles zénithaux incidents ($\theta_s$) importants et une valeur élevée de $u_f$ . Ainsi, la méthode des barycentres tend à surestimer la diffusion au nadir.

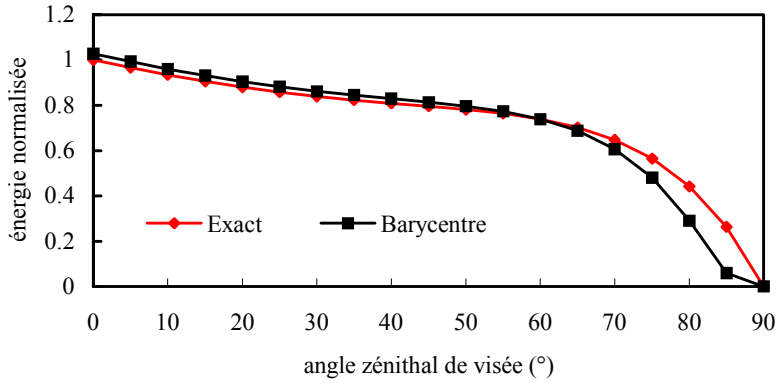



*Figure II.10 : Diffusions d'ordre 1 exactes et simulées par DART. $\theta_s$=50°. LAI = 2. LAD sphérique.*

En fait, l'erreur d'ordre 1 due à la méthode des barycentres es nulle si l'on considère un barycentre par direction de diffusion. Il faut pour ceci que ce barycentre soit défini comme étant le point d'altitude $z_m(\Omega_v)$ donnant la diffusion exacte ($W_{1\ exacte}(\Delta l\ ,\ \Omega_s \rightarrow \Omega_v)$ ) pour chaque direction de sortie ($\Omega_v$). On doit donc avoir l'égalité entre $W_{1\ exacte}(\Delta l\ ,\ \Omega_s \rightarrow \Omega_v)$ et $W_{1\ barycentre}(\Delta l\ ,\ \Omega_s \rightarrow \Omega_v)$.

Pour les directions montantes ($\theta_v$<90°), nous avons :

$$z_{m\ exact}(\Omega_v) = -\frac{|\mu_v|}{G(\Omega_v).u_f} \cdot \ln\left[\frac{\frac{G(\Omega_s).|\mu_v|}{G(\Omega_v).|\mu_s| + G(\Omega_s).|\mu_v|} \cdot \left[1 - \exp\left[-u_f.\ \Delta z.\ \left(\frac{G(\Omega_v)}{|\mu_v|} + \frac{G(\Omega_s)}{|\mu_s|}\right)\right]\right]}{\left[1 - \exp\left[-G(\Omega_s).u_f.\frac{\Delta z}{|\mu_s|}\right]\right]}\right] \qquad (2.39)$$

La dépendance, attendue, de $z_{m\ exact}$ selon ($\Omega_v$) est gênante en raison du grand nombre de directions de diffusion. L'approche suivante a donc consisté à essayer de trouver un point origine moyen optimal.

Le développement limité à l'ordre 2 des expressions (2.30) et (2.39), avec l'hypothèse $\left[\left[\frac{G(\Omega_s)}{|\mu_s|}+\frac{G(\Omega_v)}{|\mu_v|}\right].u_f.\Delta z\right]$ petit, conduit à :

$$z_{m\ barycentre} = \frac{\Delta z}{2} - \frac{G(\Omega_s).u_f.\Delta z^2}{8.|\mu_s|} \qquad (2\ 40)$$

$$z_{m\ exact}(\Omega_v) = \frac{\Delta z}{2} - \frac{2.G(\Omega_s).|\mu_v| + G(\Omega_v).|\mu_s|}{24.|\mu_s|.|\mu_v|}.u_f.\Delta z^2 \qquad (2.41)$$

Ces expressions montrent que l'approximation originale du barycentre est donc exacte à l'ordre 1 si l'on ne garde que les termes d'ordre 1 en $\Delta z$ . Par contre, les termes $z_{m\ exact}$ et $z_{m\ barycentre}$ diffèrent à l'ordre 2. Ainsi, avec un LAD sphérique ($G(\Omega)=0.5\ \forall\ \Omega$), la méthode originale des barycentres sous-estime $z_m$ si $\theta_v < \theta_s$, ce qui implique $W_{1\ exact} < W_{1\ barycentre}$. Par contre, $z_{m\ barycentre}$ est surestimé si $\theta_s<\theta_v<90°$ ce qui explique $W_{1\ exact} > W_{1\ barycentre}$. Si le LAD n'est pas sphérique, la surestimation ou sous-estimation dépendra du LAD considéré. Si $\theta_v \to 90°$, alors $z_{m\ exact} \to 0$, car seuls les rayons diffusés par le haut de la couche $\Delta z$ peuvent sortir de cette couche. D'autre part, si $u_f \to \infty$ avec $\Delta z$ fini, alors $z_{m\ exact}$ et $z_{m\ barycentre}$ tendent vers 0, avec pour les directions montantes $W_{1\ exact}(\Delta z, \Omega_s \to \Omega_v) \to \frac{G(\Omega_s).|\mu_v|}{G(\Omega_v).|\mu_s| + G(\Omega_s).|\mu_v|}.W_{in}(\Omega_s)\ .\ T(\Omega_s\ ,\ \Omega_v)$ et $W_{1\ barycentre}(\Delta z\ ,\ \Omega_s \to \Omega_v) \to Win(\Omega_s).T(\Omega_s\ ,\ \Omega_v).\exp\left[-\frac{G(\Omega_v).|\mu_s|.\ln(2)}{G(\Omega_s).|\mu_v|}\right]$ . Des résultats équivalents sont obtenus pour les directions descendantes.

Les résultats précédents montrent que $z_m$ varie de manière régulière avec $\theta_v$, avec un sens de variation qui dépend du signe de $\mu_v$, c'est à dire selon que les directions de diffusion sont montantes ou descendantes. Par suite, la solution retenue consiste à définir un barycentre moyen ($z_{m\ exact\ \uparrow}$) pour les directions montantes et un barycentre moyen ($z_{m\ exact\ \downarrow}$) pour les directions $\Omega_v$ descendantes. Les barycentres moyens sont tels que l'emploi de $z_{m\ exact,\uparrow}$ et $z_{m\ exact,\downarrow}$ entraîne des erreurs nulles pour des directions moyennes pré-définies montantes $\Omega_{m\uparrow}$ et descendantes $\Omega_{m\downarrow}$. On a alors $z_{m\uparrow} = z_{m\ exact}(\Omega_{m,\uparrow})$ et $z_{m\downarrow} = z_{m\ exact}(\Omega_{m,\downarrow})$. En fait, cette solution permet de diminuer l'erreur dans une plage de directions $\theta_v$ montantes et descendantes. La différence $[z_{m\ exact}(\theta) - z_{m\ exact}(\theta_m)]$ change de signe pour $\theta=\theta_m$, ce qui signifie que $W_1$ est surestimé ou sous-estimé selon que $\theta$ est supérieur ou inférieur à $\theta_m$ . Par rapport à l'approche du barycentre classique, le barycentre optimisé permet d'éviter une erreur d'estimation systématique pour toute direction de visée montante ou descendante.

Ainsi, par exemple, un angle $\theta_{m\uparrow}$=20° donne une erreur nulle pour $\theta_v$=20° et de très faibles erreurs pour les directions de visée autour du nadir ($\theta_v$<45°), c'est à dire pour les directions les plus fréquemment utilisées en télédétection. La *Figure II.11* montre les distributions angulaires exacte et approchée (barycentre et barycentre optimal avec $\theta_{m\uparrow}$=20°) de l'énergie diffusée normalisée pour les directions autour du nadir. Diverses simulations font apparaître que $\theta_{m\uparrow}$=20° représente un bon compromis.

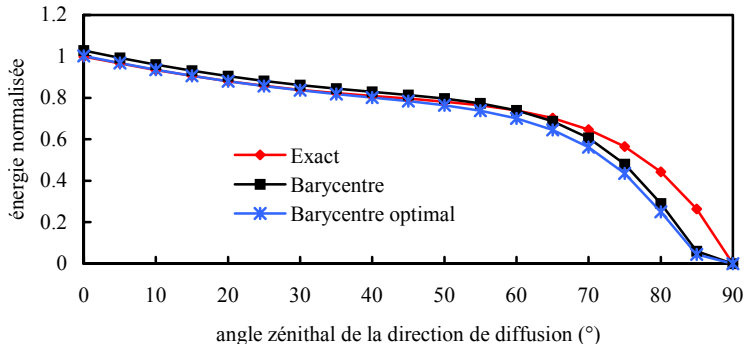



*Figure II.11 : Comparaison des trois méthodes de calcul du barycentre (Exact, Barycentre originel et Barycentre optimal) réalisés pour la diffusion d'ordre 1 normalisée. LAI=2, LAD sphérique et $\theta_s$=50°. Ce cas est extrême car le LAI des cellules est en général très inférieur à 2.*

### II.1.6 Prise en compte de l'anisotropie du rayonnement diffus intercepté

Dans la version précédente de DART, les diffusions d'ordre 2 et plus étaient calculées sans tenir compte de la distribution angulaire du rayonnement incident à l'origine du rayonnement intercepté $W_{int}$. L'hypothèse d'un rayonnement incident isotrope permettait d'exprimer le rayonnement diffusé sous la forme :

$$W_{diff}(\Omega_s,\Omega_v) = W_{int}.\int_{4\pi} T_d(\Omega_s , \Omega_v).d\,\Omega_s \qquad (2.42)$$

En fait, l'énergie réellement diffusée est :

$$W_{diff}(\Omega_s , \Omega_v) = \int_{4\pi} W_{int}( \Omega_s).T_d(\Omega_s , \Omega_v).d\,\Omega_s \qquad (2.43)$$

Soit, avec des sommes discrètes :

$$W_{diff}(\Omega_v) = \sum_{i=0}^{N_{dir}} \left[ \int_{\Delta\Omega i} W_{int}( \Omega_s).d\,\Omega_s \,.\, T_d(\Omega_{si} , \Omega_v)\right] \quad \text{où} \quad \Omega_{si} \in \Delta\Omega_i \qquad (2.44)$$

Divers travaux (Guillevic, 1999) ont montré que l'erreur due au fait de négliger la direction du rayonnement incident implique la non vérification de l'égalité théorique

$\rho_{hd}=\rho_{dh}$, où $\rho_{hd}$ est le facteur de réflectance "hémisphérique-direct" et où $\rho_{dh}$ est le facteur de réflectance "direct-hémisphérique" . La solution retenue ici est de prendre partiellement en compte la direction du rayonnement incident. Pour cela, l'espace des directions ($4\pi$) est divisé en un nombre fini ($N_{sect}$ = 1, 2, 6, 10 ou 14) (*Figure II.12*) de secteurs ($\Delta\Omega_{sect,i}$) pour lesquels on garde en mémoire $W_{int}(\Delta\Omega_{sect,i})$. Il est ainsi conservé une représentation schématique de la distribution directionnelle du rayonnement incident. En première approximation, $T_d(\Omega_{si}, \Omega_v)$ est une somme dans le secteur angulaire $\Delta\Omega_{sect,i}$ :

$$W_{diff}(\Omega_v) = \sum_{i=0}^{N_{sect}} \int_{\Delta\Omega sect\ i} W_{int}(\Omega_s).d\Omega_s \ . \int_{\Delta\Omega sect\ i} T_d(\Omega_s, \Omega_v).d\Omega_s \qquad (2.45)$$

Ainsi, tous les FRD sont simulés comparés en terme de RMSE (*Root Mean Square Error*) et ME (*Maximal Error*) avec les simulations du modèle DART Monte Carlo (Colas, 1998), supposé ici exact. Ce modèle de référence est similaire à DART, car il utilise la même représentation du paysage et le même type de suivi de rayons. Cependant, pour le modèle DART Monte Carlo, un rayon n'est pas un flux mais un photon unique dont les mécanismes d'interaction (interception, diffusion et direction de diffusion) avec la matière sont gérés avec la loi de Monte Carlo. L'intérêt de la méthode du modèle DART Monte Carlo est de gérer toute diffusion multiple comme une simple diffusion d'ordre1 qui fait suite à d'autres diffusions d'ordre 1.

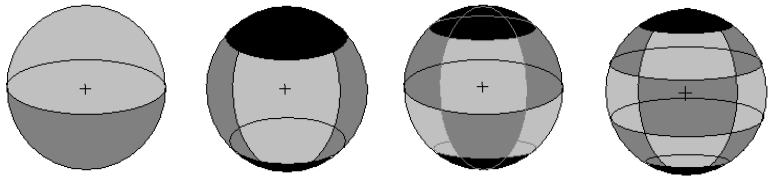



*Figure II.12 : Décomposition de l'espace des directions de propagation du rayonnement en 2, 6, 10 et 14 secteurs angulaires.*

La comparaison "DART - DART Monte Carlo" est réalisée pour les deux types de maquettes de référence, c'est à dire un couvert turbide et un couvert arboré. L'accent a tout d'abord été mis sur le couvert turbide homogène. De manière logique, les plus fortes erreurs ont tendance à apparaître avec les couverts caractérisés par un fort LAI, une fonction de phase très anisotrope (*e.g.*, LAD planophile, $\rho_f \neq \tau_f$ ) et un sol de faible réflectance. La *Figure II.13* donne les RMSE et ME pour la configuration particulière $\theta_s$ = 20°, ($\rho_f$ , $\tau_f$)=(45% , 0%), LAI=2 et LAD planophile.

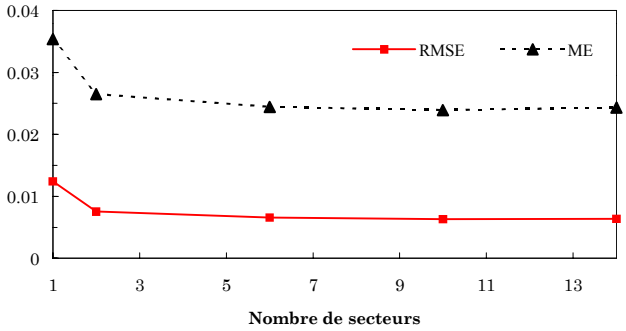



*Figure II.13 : RMSE et ME de DART par rapport à DART Monte Carlo, selon le nombre de secteurs angulaires. $\theta_s$ = 20°, ($\rho_f$, $\tau_f$)=(45%, 0%), LAI=2 et LAD planophile. La réflectance au nadir du couvert est ≈ 21%.*

De manière prévisible, les erreurs diminuent quand le nombre de secteurs angulaires augmente. Cette diminution est surtout importante quand on passe d'un secteur à deux secteurs. Dans ce cas, la prise en compte de deux secteurs (une direction ascendante et une direction descendante) semble apporter une précision suffisante. Comme déjà indiqué ci-dessus, les erreurs sont dues à l'anisotropie du rayonnement intercepté.

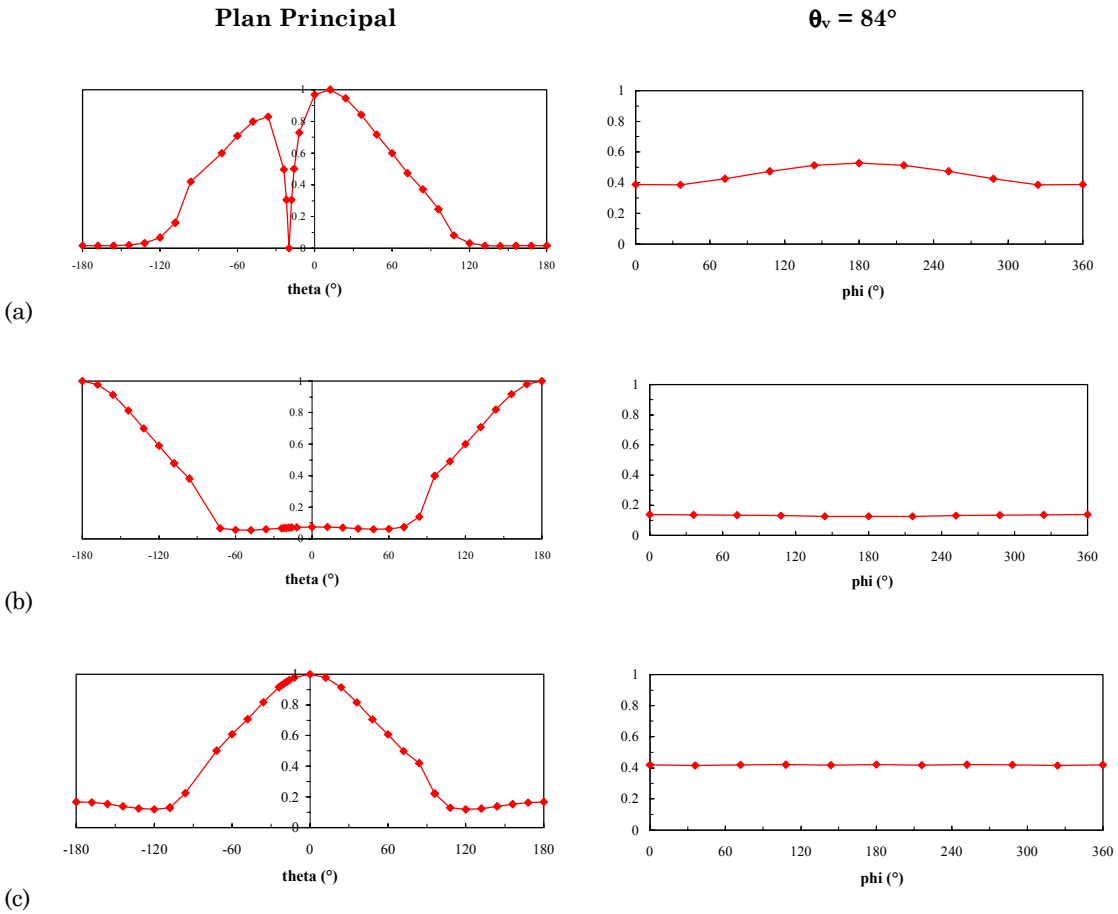



*Figure II.14 : Distribution angulaire normalisée du rayonnement intercepté après les diffusions d'ordre 1 (a), d'ordre 2 (b) et d'ordre 3(c) dans le plan principal (gauche) et pour $\theta_v$ = 84° (droite). $\theta_v$<0 demi-plan solaire. Le couvert a les mêmes caractéristiques que pour le cas de la Figure II.13 et la cellule étudiée est située au centre du couvert.*

Ainsi, après une seule diffusion, la distribution angulaire (*Figure II.14*) du rayonnement intercepté est très anisotrope, avec des valeurs fortes pour $\theta_v$ proche de 0° et très faibles pour $\theta_v$ proche de 180°.

Le même type d'anisotropie survient pour les rayonnements interceptés dont l'ordre de diffusion est impair. Inversement pour les ordres pairs (2,4,6,…) le rayonnement montant est faible et le rayonnement descendant moyen reste fort. La répétition de tendances similaires pour les ordres pair et impair est simplement due au fait que le LAD est planophile et que $\tau_f = 0$.

A l'ordre 1 et dans le plan principal, un minimum survient pour la direction du *hot-spot*, car les rayons diffusés selon cette direction à l'ordre 1 traversent la cellule sans être interceptés.

L'hypothèse selon laquelle le rayonnement intercepté est dû à un rayonnement incident isotrope est donc erronée. L'imprécision due à cette hypothèse dépend de nombreux paramètres comme le LAD, le LAI et la hauteur dans le couvert. Ainsi, la *Figure II.15* indique la distribution angulaire du rayonnement incident absorbé par une cellule située au centre d'un couvert turbide homogène avec $\theta_s = 0°$, $\rho_f = \tau_f = 45\%$, LAI=2 et LAD sphérique. Par rapport au cas précédent d'un couvert avec un LAD planophile, les rayons d'ordre 1 interceptés ont une distribution angulaire beaucoup plus symétrique par rapport à l'horizontale. De plus, cette distribution angulaire est symétrique par rapport à la verticale, car la direction solaire est elle-même verticale. Les variations azimutales sont très faibles.

Il apparaît deux maxima centrés autour des directions $\theta = \pm 90°$, en raison de l'augmentation du nombre d'intercepteurs selon ces directions. Le minimum selon la verticale montante est dû au *hot-spot*. Cette fois-ci le rayonnement absorbé présente une symétrie par rapport à la verticale, car la direction solaire est elle-même verticale. Les variations azimutales restent très faibles. D'autre part, la distribution angulaire normalisée du rayonnement incident absorbé devient stable dès la diffusion d'ordre 3.

Les travaux menés avec un couvert turbide homogène ont donc montré l'intérêt de mémoriser la direction originale du rayonnement intercepté pour bien simuler la diffusion. De plus, ils ont montré qu'un nombre de secteurs aussi limité que 2 est un bon compromis (RMSE<0.01).

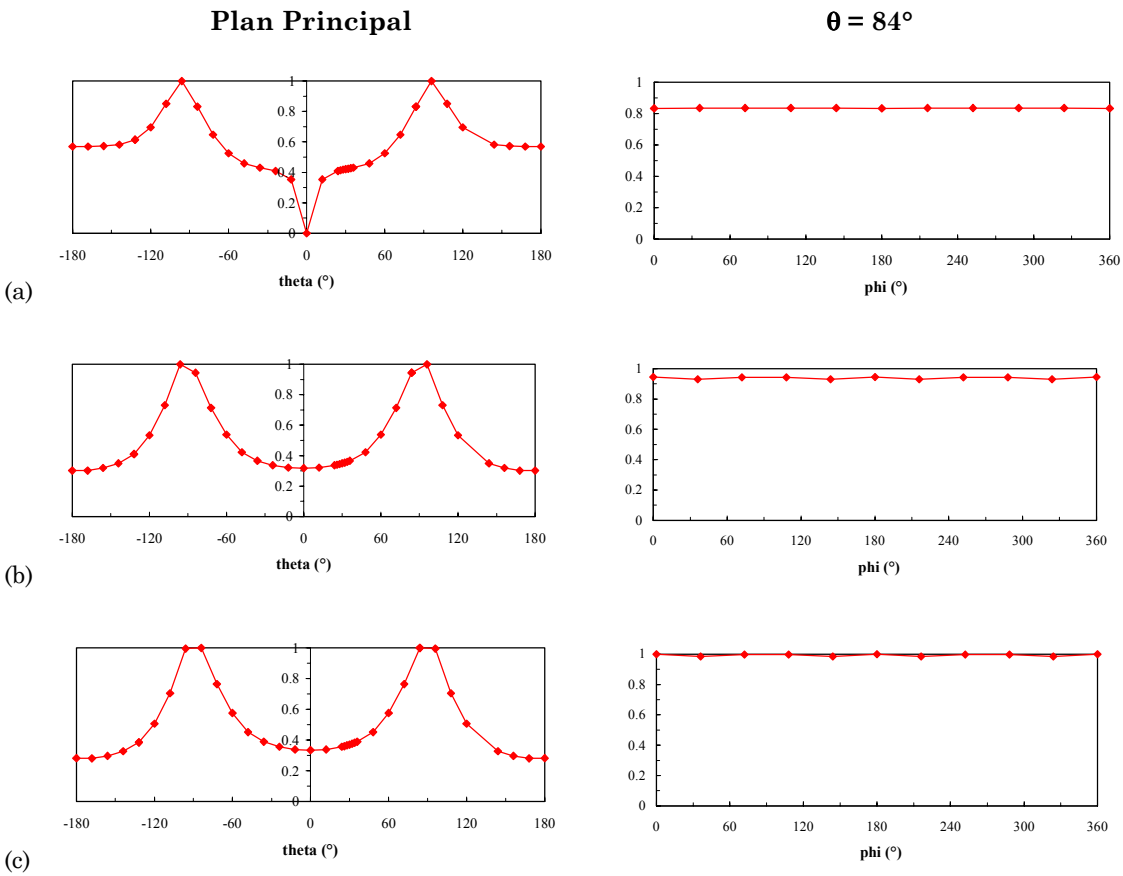



*Figure II.15 : Distribution normalisée du rayonnement absorbé après les diffusions d'ordre 1 (a), d'ordre 2 (b) et d'ordre 3 (c) dans le plan principal et les directions d'angle zénithal de visée θ = 84° .*

Par contre, dans le cas de couverts arborés (scène H1DUN20), les plus fortes erreurs (RMSE et ME) indiquent la nécessité d'utiliser un plus grand nombre de secteurs angulaires (*Figure II.16*).

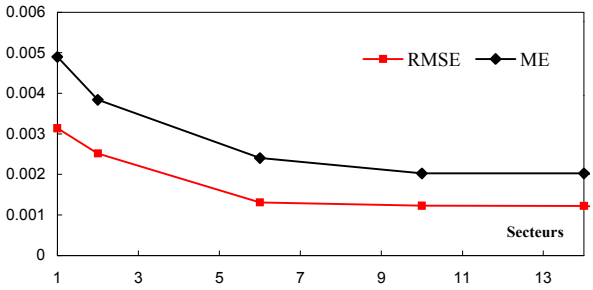



*Figure II.16 : Évolution du RMSE et ME "DART vs. DART Monte Carlo" en fonction du nombre de secteurs (H1DUN20). La réflectance au nadir est ≈25.3% avec 1 secteur.*

La distribution angulaire du rayonnement intercepté par un couvert arboré doit être mémorisée avec une meilleure précision que pour un couvert turbide, car elle est plus anisotrope. Ceci est montré avec la distribution normalisée du rayonnement intercepté

d'ordre 1 (*Figure II.17*), 2 et 3, pour une cellule de feuillage située à la périphérie d'une couronne d'arbre.

Finalement, il est apparu que le nombre optimal de secteurs pour DART est 6. La prise en compte de plus de secteurs n'apporte sensiblement rien à la réduction du RMSE et ME. Ainsi, 6 secteurs assurent un RMSE inférieur à 0.002 pour le couvert arboré et inférieur à 0.01 pour la couche homogène. Ce choix a aussi été contraint par le souci de ne pas trop augmenter les ressources informatiques.

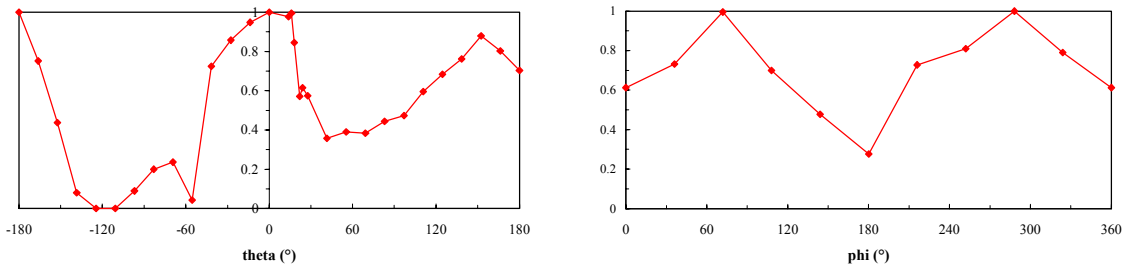



*Figure II.17 : Distribution normalisée du rayonnement incident d'ordre 1 intercepté dans le plan principal (gauche) et pour un angle azimutal (thêta) égal à 84° (droite).*

### II.1.7 Modification du point d'émission du rayonnement diffusé

Dans la version originelle du modèle DART, chaque cellule de feuillage diffuse un rayonnement dont l'intensité dépend de la position du barycentre énergétique, et dont l'origine géométrique est toujours le centre de la cellule. Le choix de cette origine accélère les calculs, mais est une source d'erreur, car le centre de la cellule et le barycentre ne coïncident pas. Par la suite, les trajets des rayons issus du centre de la cellule et d'un barycentre peuvent différer considérablement, surtout pour les directions de diffusion très obliques. La *Figure II.18* illustre cette différence de trajet dans le cas d'une couche horizontale de cellules similaires.

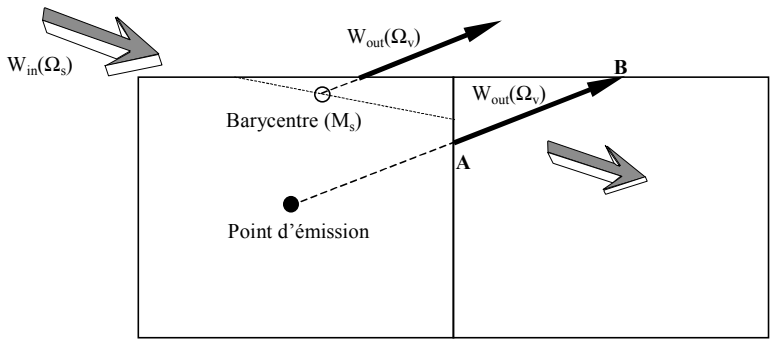



*Figure II.18 : Erreur de trajectoire. Eclairée par $W_{in}(\Omega_s)$, la cellule foliaire diffuse $W_{out}(\Omega_v)$ (Figure II.4). Si le milieu est homogène, le suivi de $W_{out}(\Omega_v)$ à partir du centre de la cellule et non de $M_s$ entraîne une augmentation de trajet égale à AB. Par suite, la diffusion pour les directions obliques est diminuée.*

La solution généralement adoptée pour diminuer ce problème est d'employer une discrétisation plus fine de la scène simulée. En effet, toute diminution de la taille des cellules réduit la distance entre les barycentres et les centres des cellules, ce qui diminue la différence entre les trajets optiques. Le problème est que toute amélioration de la résolution spatiale d'un facteur N augmente le temps de calcul ($T_{calcul}$). Ainsi, le temps de calcul devient $T_{calcul} \approx N^3.(D_1+n.D_n)+N.(I_1+n.I_n+S_1+n.S_n)$, où n est le nombre de directions, $D_1$ et $D_n$ représentent les temps de calcul de la diffusion à l'itération d'ordre 1 et à toute itération supérieure à 1, pour toute cellule non sub-divisée. Les termes $I_1$ et $I_n$ sont respectivement les temps de calcul de l'interception pour l'itération d'ordre 1 et pour une itération d'ordre supérieur à 1. Les termes $S_1$ et $S_n$ sont les temps de calcul du suivi de rayons respectivement pour l'itération k=1 et n>1.

Emission par les faces

Une première solution envisagée est que le rayonnement diffusé soit émis à partir de la face d'où sortirait $W_{out}(\Omega_v)$ si l'origine était le barycentre. Cette approche peut être améliorée en divisant les faces en $N_{sf}^2$ sous-faces telles que l'origine de tout rayon est le centre de la sous-face qu'il traverse. Ce point dépend donc de la position du barycentre ($M_s$) et de la direction $\Omega_v$. La *Figure II.19* représente un cas où $N_{sf}=3$. Le rayon $W_{out}(\Omega_v)$ est donc supposé provenir du point (a).

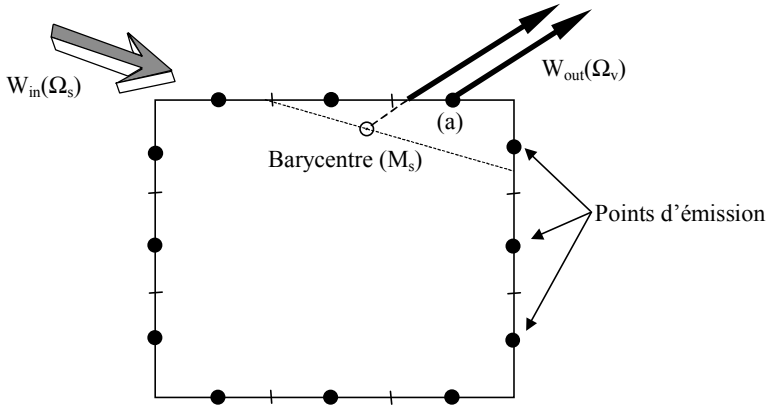



*Figure II.19 : Diffusion à, partir des faces de la cellule. L'origine réelle ($M_s$) du rayon $W_{out}(\Omega_v)$ est remplacée par le centre (a) de la sous face traversée par ce rayon.*

Cette technique de "discrétisation de surface" augmente en général moins le temps de calcul que l'amélioration de la "discrétisation de volume" des cellules. On a $T_{calcul} \approx (D_1'+D_n')+N_{sf}^2.(S_1+I_1)+(n.S_n+n.I_n)$ où $D_1'$ et $D_n'$ représentent les nouveaux temps de calcul associés à la diffusion ($D_1' \approx 9.D_1$ et $D_n' \approx 9.D_n$).

Emission à partir du barycentre

Une deuxième solution consiste à émettre les rayons d'un point aussi proche que possible du barycentre. Cette méthode permet d'approcher le trajet réel des rayons sans augmenter significativement les temps de calcul.

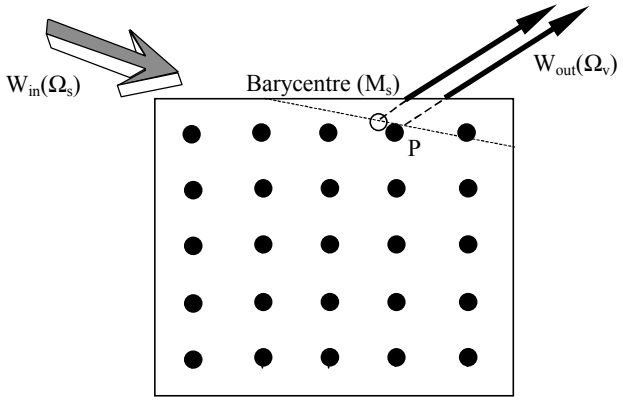



*Figure II.20 : Émission du barycentre énergétique de la cellule.*

Tout rayon associé au barycentre $M_s$ sera émis du point d'émission P le plus proche (*Figure II.20*). La contrainte majeure de cette méthode est qu'elle requiert le pré-calcul de $N_{sc}^3$ fois plus de trajets que l'approche classique. Ceci augmente notablement l'espace mémoire requis pour stocker tous les trajets pré-calculés. En fait, l'espace mémoire est fortement diminué en pré-calculant :

- Les $N_{sc}^3.N_{dir}$ trajets possibles entre les $N_{sc}^3$ sous-cellules et la face inférieure ou supérieure de la première cellule d'un niveau voisin rencontrée.
- Les $N_{sf}^2.N_{dir}$ trajets possibles à partir des $N_{sf}^2$ points d'émission situés sur les faces supérieure et inférieure de toute cellule.

L'augmentation de l'espace mémoire associé à l'augmentation du nombre de trajets pré-calculés est alors proche de $N_{sf}^2$ car les $N_{sf}^2.N_{dir}$ trajets sont toujours très petits. L'espace mémoire nécessaire est donc peu augmenté. D'autre part, la seule augmentation du temps de calcul est due au pré-calcul des trajets possibles. Par suite, cette méthode du barycentre augmente très peu le temps de calcul des simulations DART.

Comparaison des méthodes

Les performances des deux méthodes présentées ci-dessus sont comparées à l'émission à partir du centre de la cellule. Le modèle DART Monte Carlo est utilisé comme référence

pour calculer l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et de l'erreur maximale (ME) entre les FRD. L'émission à partir du centre de la cellule a tout d'abord été comparée avec l'émission à partir des sous faces (cas $N_{sf}$ = 1, 3 et 5) pour toutes les configurations de la couche homogène de végétation. Ce travail est effectué avec différents niveaux de discrétisation de la scène. Pour des simulations avec la même densité foliaire par cellule, l'émission à partir des faces s'avère plus précise dès que $N_{sf}$>1. Par contre, l'émission à partir d'un seul sous-point d'émission ($N_{sf}$=1) par face peut introduire une erreur géométrique supérieure à celle associée à l'émission à partir du centre. Néanmoins, quand on compare le RMSE et le ME pour des temps de calculs égaux, l'émission à partir du centre est généralement plus performante. La *Figure II.21* montre le cas le plus favorable parmi ceux étudiés pour l'émission à partir des faces (LAI=4, LAD=érectophile, domaine VIS, $\theta_s$=50°).

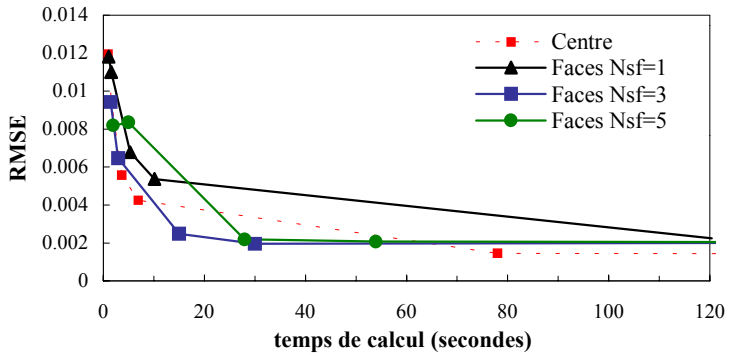



*Figure II.21 : Évolution du RMSE d'une couche végétale homogène.*

Pour les scènes forestières, l'évolution du RMSE par rapport au temps de calcul est similaire à celle de la couche homogène (*Figure II.22*). Cette étude montre que l'émission à partir des sous-faces n'offre aucun intérêt en terme de précision par rapport au temps de calcul. En fait, l'emploi des sous-faces n'est intéressant que pour des scènes qui ont une très forte densité foliaire par cellule.

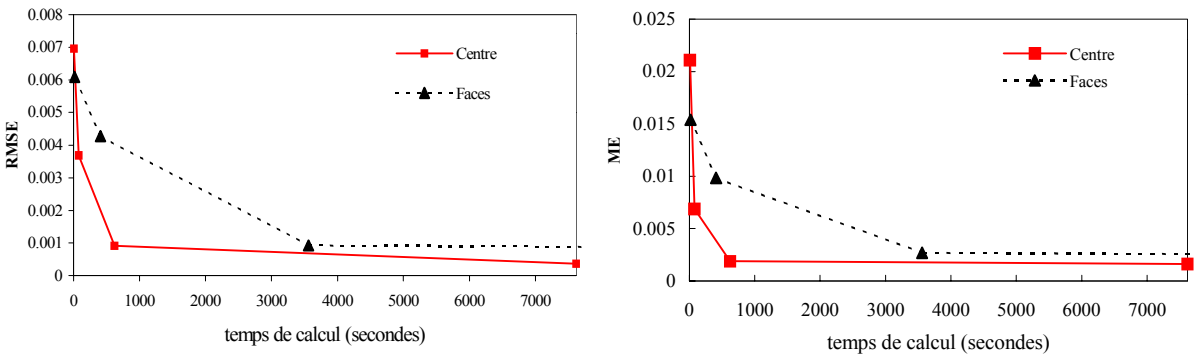



*Figure II.22 : Comparaison des performances pour la scène H1DUR50 avec $N_{sf}$=5.*

L'émission centrale a ensuite été comparée à l'émission à partir du point P le plus proche du barycentre (avec $N_{sc}$ = 3, 5 et 7). Cette méthode n'augmentant pas les temps de calcul, la comparaison a porté sur les RMSE et ME pour un LAI par cellule donné. L'emploi des points P est toujours intéressant si le LAI par cellule est supérieur à 1 et $N_{sc}$>3. Il diminue l'erreur relative, jusqu'a 60%. Ceci est illustré ici avec le cas "LAI=4, LAD érectophile, domaine VIS, $\theta_s$=50°" (*Figure II.23*).

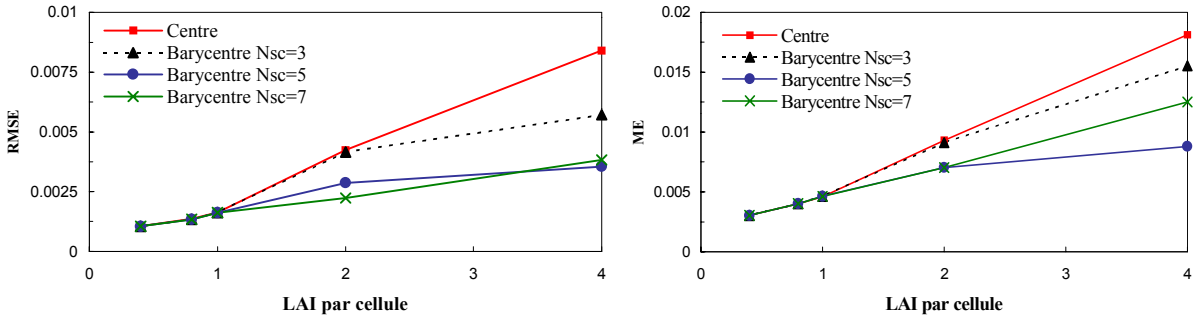



*Figure II.23 : RMSE et ME des diffusions «centre» et «barycentre» pour la couche turbide homogène. La simulation Monte Carlo sert de référence.*

Pour le couvert forestier, comme pour le milieu turbide, l'emploi de sous-cellules diminue beaucoup les erreurs si les cellules ont un LAI supérieur à 1 (*Figure II.24*).

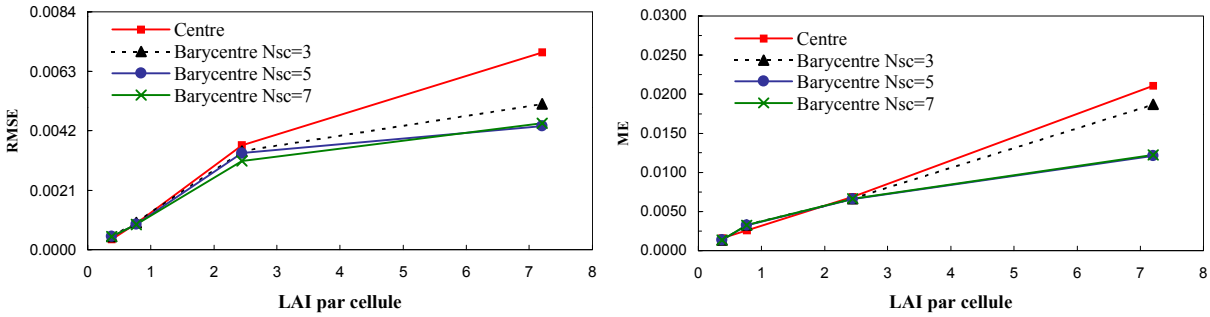



*Figure II.24 : RMSE et ME des diffusions «centre» et «barycentre» pourH1DUR50.*

En résumé, la diffusion à partir du sous-centre plus proche du barycentre est judicieuse dès que le LAI par cellule est supérieur à 1. C'est pourquoi, la méthode des sous-cellules avec $N_{sc}$=5 est devenue la méthode de diffusion dans le modèle DART.

### II.1.8 Évaluation des améliorations apportées

L'ensemble des améliorations introduites a été évalué en comparant les simulations du nouveau DART aux simulations des modèles 3-D de l'expérience RAMI (*Figure II.25*).

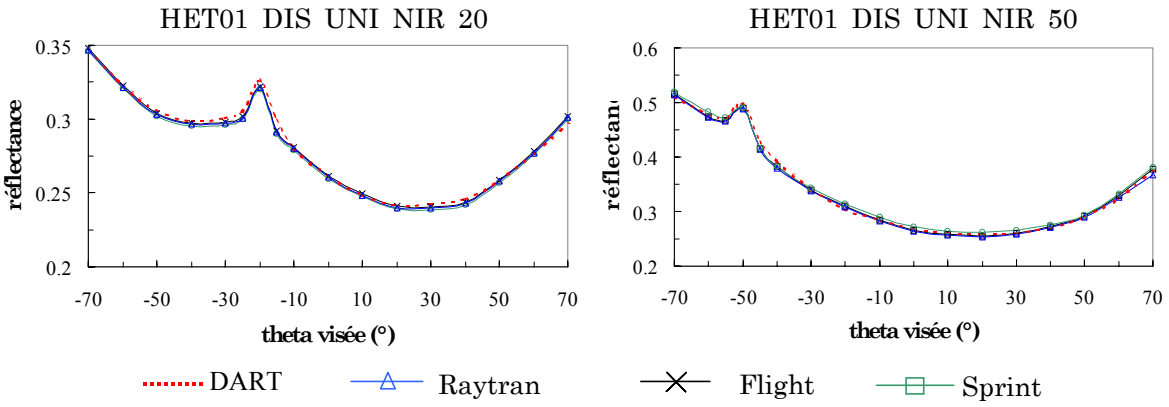



*Figure II.25: Simulations des modèles DART, Raytran, Flight et Sprint de l'expérience RAMI.*

Dans le domaine proche infrarouge, c'est à dire le domaine pour lequel les divergences étaient les plus accentuées, les écarts entre les modèles ont été réduits d'un facteur 3. Ainsi, l'écart relatif maximal entre le modèle DART et les autres modèles est passé de 9.6% à 3.0% pour $\theta_S$=20° et de 11.1% à 3.2% pour $\theta_S$=50°. Ceci montre la pertinence et la cohérence des améliorations apportées. Finalement, il convient de noter que DART a été amélioré tout en préservant ses principales originalités par rapport aux autres modèles, comme par exemple la simulation d'images, la souplesse d'utilisation et de création de maquettes informatiques de paysages.

## II.2 Modélisation du transfert radiatif des surfaces opaques

D'un point de vue radiatif, les éléments opaques du paysage (relief, bâtiments, murets, etc.) peuvent être vus comme la surface opaque externe qui les enveloppe. La version initiale de DART ne permettait pas de simuler précisément ces éléments. En effet, leur représentation était seulement réalisée par la juxtaposition de cellules opaques pleines (*Figure II.26*). Cette description simplifiée engendrait un transfert radiatif imprécis. Ainsi, la diffusion de l'énergie interceptée était émise uniquement depuis le centre des faces des cellules. De plus, la réflectance de ces dernières était caractérisée exclusivement par une diffusion de type lambertien.

Pour remédier à ces limitations, nous avons introduit dans le modèle une représentation plus fine des éléments opaques du paysage caractérisée par des figures géométriques (triangles et parallélogrammes) (*Figure II.27*). L'enveloppe de tout objet opaque est désormais représentée en tant que juxtaposition de triangles et de parallélogrammes appelés figures opaques élémentaires.

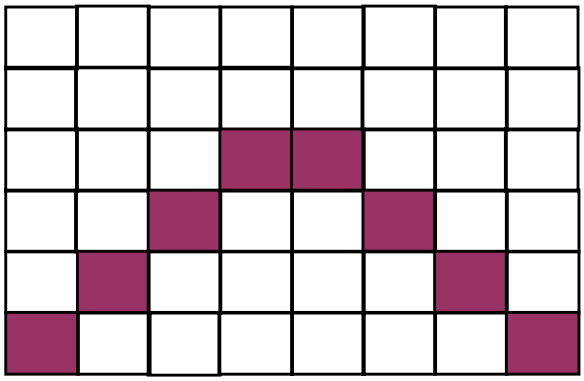


*Figure II.26 : Coupe transversale d'une discrétisation de deux plans en cellules opaques pleines.*

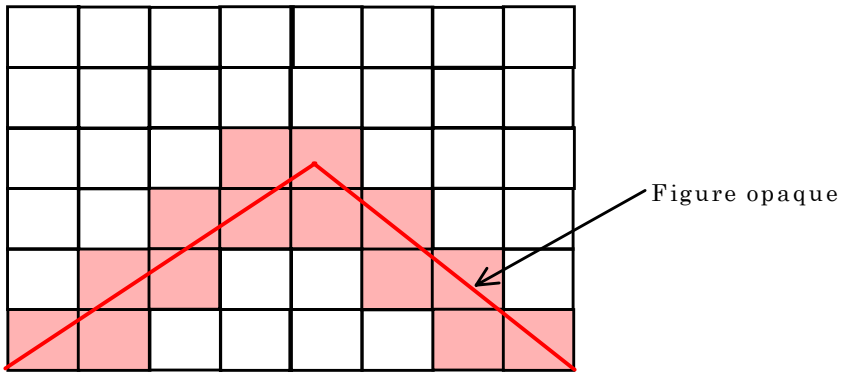



*Figure II.27 : Coupe d'une discrétisation de deux plans en cellules qui contiennent des figures opaques à l'intérieur.*

Les cellules de type *Sol, Sol_MNT*, *Mur*, *Toit*, *Route_MNT*, *Route*, *Eau, Eau_MNT* et *Tronc* correspondent à des cellules qui contiennent partiellement ou totalement une de ces figures géométriques.

### II.2.1 Caractéristiques des figures opaques

Chaque figure opaque élémentaire est caractérisée par :

- La nature de la figure (triangle ou parallélogramme).
- Les coordonnées des 3 sommets de la figure.
- Le vecteur normal à la figure dirigé vers l'extérieur de l'élément opaque qu'elle enveloppe.
- Le type d'élément (*Mur, Toit, Route, Tronc, etc.*) représenté.
- Un indice sur les paramètres optiques stockés dans le fichier *coeff_scat.src* (*cf.* § I.3) qui sont associés à la figure.

Les figures opaques élémentaires peuvent traverser plusieurs cellules. Si une cellule est coupée par des figures opaques de différents éléments de la maquette (e.g. toit et mur),

le type retenu est celui du dernier élément installé pendant la création de la maquette. Les parallélogrammes n'ont pas été décomposés en deux triangles en raison d'une optimisation interne des calculs du modèle.

Pour un vecteur puissance $W_{in}(\Omega_s)$ incident sur une figure opaque de normale ($\Omega_n$), l'expression générale de la puissance diffusée $W_{diff}(\Omega_v)$ selon une direction $\Omega_v$ est $W_{diff}(\Omega_v) = T_d(j,\Omega_s,\Omega_v).W_{int}(\Omega_s)$ (*Figure II.28*). Si la réflectance du sol est lambertienne, alors $T_d(j,\Omega_s,\Omega_v) = \frac{\rho_{sol}}{\pi}.|\Omega_n.\Omega_v|.\Delta\Omega$ .

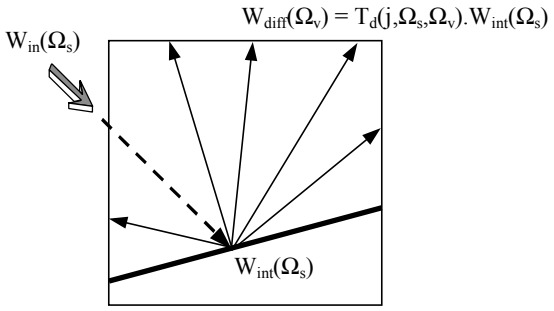



*Figure II.28 : Schéma des mécanismes d'interaction à l'intérieur d'une cellule "opaque".*

Pour une figure opaque de vecteur normal ($\Omega_n$) et de facteur de réflectance directionnelle $\rho(\Omega_s,\Omega_v)$, la fonction de transfert diffuse $T_d$ ($\Omega_s,\Omega_v$) est :

$$T_d(\Omega_s,\Omega_v) = \frac{\rho(\Omega_s,\Omega_v)}{\pi}.\cos(\Psi_{vn}).\Delta\Omega_v \qquad (2.46)$$

Les 4 types possibles de diffuseur des figures opaques élémentaires sont :

- *Type 0* :

  Diffuseur lambertien avec $\rho(\Omega_s,\Omega_v)$ constante et égale à l'albédo ($\omega$).

  $$\rho(\Omega_s,\Omega_v) = \rho_{lamb} \qquad (2.47)$$

- *Type 1* :

  Diffuseur lambertien plus une composante spéculaire qui permet de prendre en compte la polarisation de la surface.

  $$\rho(\Omega_s,\Omega_v) = \rho_{lamb}(\Omega_s,\Omega_v) + \rho_{spec}(\Omega_s,\Omega_v) \qquad (2.48)$$

  La composante spéculaire est définie par la demi-largeur angulaire ($\alpha$), l'amplitude du pic spéculaire (A) et l'indice de réfraction (n) (Kong, 1986).

  $$\rho_{spec} = \frac{1}{2}.\{[\frac{\tan(\psi_{sn}-\theta_t)}{\tan(\psi_{sn}+\theta_t)}]^2+[\frac{\sin(\psi_{sn}-\theta_t)}{\sin(\psi_{sn}+\theta_t)}]^2\}.A.[\frac{\alpha^2}{4}-\Psi_{vv^*};^2\ ] \qquad (2.49)$$

  avec $\sin\theta_t = \frac{\sin(\psi_{sn})}{n}$ et $\psi_{vv^*}$ étant l'angle entre les directions de visée et spéculaire.

Le pic de réflectance spéculaire peut induire une forte surestimation ou sous-estimation du rayonnement total diffusé dû à la discrétisation de l'espace de directions. Afin de palier cette éventuelle erreur, le modèle calcule l'énergie totale qui est théoriquement diffusée par la figure et la repartit entre les directions inclues dans le cône spéculaire, avec un facteur de proportionnalité ($\frac{\alpha^2}{4}$-$\Psi_{vv*}$;$^2$ ).

Pour les ordres supérieurs (itération k>1), on emploie un coefficient lambertien équivalent, qui est la somme de la réflectance lambertienne et de la réflectance spéculaire moyenne. L'expression obtenue pour cette dernière est $<\rho_{spec}>$ =

$$\int_0^{\alpha/2}\int_0^{\pi/2}\{[\frac{1}{2}.\frac{tg(\psi_{sn}-\theta_t)}{tg(\psi_{sn}+\theta_t)}]^2+[\frac{\sin(\psi_{sn}-\theta_t)}{\sin(\psi_{sn}+\theta_t)}]^2\}.A.(\frac{\alpha^2}{4}-\psi_{vv*}{}^2).\sin(\psi_{vv*}).\cos\psi_{sn}.\sin\psi_{sn}.d\psi_{sn}.\psi_{vv*}.$$

- <u>Type 2</u> :

  Diffuseur dont la réflectance suit le modèle de Hapke (Hapke, 1981) associée à une composante spéculaire.

$$\rho(\Omega_s,\Omega_v) = \rho_{Hapke}(\Omega_s,\Omega_v) + \rho_{spec}(\Omega_s,\Omega_v) \quad (2.50)$$

  La composante de Hapke assimile le sol à une surface plane qui sépare un demi-espace vide d'un autre composé de particules avec une fonction de phase $P(\Omega_s,\Omega_v)$, disposées aléatoirement et dont la dimension est grande devant la longueur d'onde.

$$\rho_{Hapke}(\Omega_s,\Omega_v) = \omega.\frac{1}{\cos(\psi_{vn})+\cos(\psi_{sn})}.[[1+B(\Omega_s,\Omega_v)].P(\Omega_s,\Omega_v)+H(\omega,-\mu_s).H(\omega,-\mu_v)-1] \quad (2.51)$$

$$B(\Omega_s,\Omega_v) = \frac{B_0}{1+\frac{1}{h}.\tan(\frac{\psi_{sv}}{2})} \qquad \text{et} \qquad H(\omega\ ,\ x) = \frac{1+2.x}{1+2.(1-\omega)^{0.5}.x} \quad (2.52)$$

$$P(\Omega_s,\Omega_v) = 1 + b_1.\cos\psi_{sv} + c_1.\frac{3.\cos^2(\psi_{sv})-1}{2} + b_2.\cos(\psi'_{sv}) + c_2.\frac{3.\cos^2(\psi'_{sv})-1}{2} \quad (2.53)$$

  $B_0$ est un terme empirique décrivant l'amplitude du *hot-spot*, h est un paramètre de rugosité lié à la porosité du milieu, $b_1$, $c_1$, $b_2$, $c_2$ sont des paramètres empiriques de la fonction de phase $P(\Omega_s,\Omega_v)$ définie par Pinty (1989). Cette fonction de phase permet de considérer les cas intermédiaires entre la diffusion spéculaire et la rétrodiffusion des particules.

  La composante spéculaire $\rho_{spec}(\Omega_s,\Omega_v)$ est définie comme pour le Type 1. Pour les diffusions multiples une réflectance spéculaire moyenne est calculée.

- <u>Type 3</u> :

  Les propriétés optiques des surfaces peuvent être représentées par une fonction de transfert diffuse $T_d(\Omega_s,\Omega_v)$ fournie en entrée du modèle.

### II.2.2 Mécanismes d'interaction onde-matière

En dehors de la création de maquettes informatiques, l'introduction des figures géométriques entraîne d'importants développements dans le modèle DART pour gérer les mécanismes d'interception et de diffusion associés à celles-ci. Ces développements ont été réalisés avec le souci d'obtenir une bonne précision radiométrique tout en minimisant les temps de calcul.

La modélisation de l'intersection entre un rayon et une figure au sein d'une cellule *Sol_MNT, Eau_MNT, Route_MNT, Mur, Toit ou Tronc* comprend 2 étapes :

(1) Pour tout rayon qui entre dans une cellule (cf. rayons $W_1(\Omega_s)$, $W_2(\Omega_s)$, $W_3(\Omega_s)$, $W_4(\Omega_s)$ dans *Figure II.29*), on estime qu'une intersection est possible si le rayon (demi-droite) intercepte le plan contenant une des figures géométriques comprises dans la cellule.

(2) Si l'intersection est possible, nous devons déterminer si le point associé se situe à la fois dans la cellule et dans la figure. L'appartenance à la cellule est simplement calculée avec un test d'encadrement des coordonnées. Par contre, l'appartenance du point à une figure est calculée au moyen d'un changement de repère pour exprimer ses coordonnées dans le repère de la figure. Les coordonnées du point sont ensuite soumises à J inéquations, correspondant à J contraintes (J étant le nombre de cotés de la figure considérée), pour déterminer si le point appartient ou non à la figure.

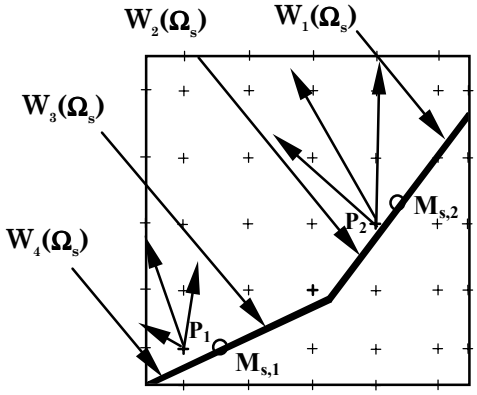



*Figure II.29 : Interception de rayons et de 2 figures géométriques.*

Le calcul de la diffusion comprend deux étapes :

(1) Détermination du barycentre énergétique et point d'origine exact de la diffusion ($M_{s,i}$). De par sa définition, ce point appartient nécessairement à la figure.

(2) Détermination du point ($P_i$) qui servira de point d'origine effectif de la diffusion. Ce point est choisi parmi la liste des centres des ($N_{sc}^3 + 6N_{sf}^2$) points qui échantillonnent la cellule.

Certains aspects de ces deux étapes sont ci-dessous décrits.

Quand une figure intercepte un rayon dans une cellule, le nouveau point d'origine (*e.g.*, $M_{s,1}$ et $M_{s,2}$ dans *Figure II.31*) de la diffusion issue de cette figure est calculé en tant que barycentre du nouveau point d'interception et du point d'origine calculé avant cette dernière interception . La position du barycentre n'est jamais réinitialisée au cours des différentes diffusions. On dispose donc à tout moment de la connaissance d'un point d'origine qui est le barycentre énergétique des points d'interception de la figure. Les trajets des rayons ne sont pré-calculés que pour les $(N_{sc}^3 + 6N_{sf}^2)$ points qui échantillonnent la cellule de diffusion. Par suite, le point "origine" effectif de la diffusion ($P_1$ et $P_2$) est défini comme le point parmi les $(N_{sc}^3 + 6N_{sf}^2)$ points satisfaisant aux contraintes suivantes :

- Il doit être le plus proche possible du point exact.
- Il doit être extérieur au volume délimité par la figure.
- Aucune figure ne doit se situer entre les points d'origine effectif et exact.

Ces contraintes sont essentielles pour assurer la précision géométrique ainsi que la conservation de l'énergie. En effet, la non conservation de l'énergie proviendrait d'une perte de rayons due à l'impossibilité de passer du point d'origine exact au point d'origine effectif.

La sélection du point d'origine effectif utilise le critère de sélection suivant. Si le vecteur "sous centre $P_i$ - figure" est de sens opposé à la normale de la figure, le sous centre est décalé d'une maille selon l'axe Ox, Oy ou Oz, selon que la coordonnée en (x), (y) ou (z) du vecteur normal à la figure est en valeur absolue la plus grande des 3. On se décale alors de $\pm\Delta x$, $\pm\Delta y$ ou $\pm\Delta z$ sur les axes correspondants. Le signe du décalage est donné par le signe de la plus forte composante du vecteur normal. De plus, $\Delta x=\Delta X/N_{sc}$, $\Delta y=\Delta Y/N_{sc}$, $\Delta z=\Delta Z/N_{sc}$ où $\Delta X$, $\Delta Y$, $\Delta Z$ sont les dimensions de la cellule et $N_{sc}^3$ est le nombre de sous centres.

Le point d'origine ainsi choisi est forcément hors du volume délimité par la figure. Cependant, le fait de déterminer le point d'origine effectif en décalant le point d'origine réel d'une ou plusieurs sous cellules peut impliquer que le point d'origine effectif est finalement hors de la cellule. Si tel est le cas, le point d'origine effectif est alors systématiquement recherché parmi tous les $N_{sc}^3+6.N_{sf}^2$ sous centres de la cellule initiale.

Finalement, de manière à assurer une robustesse maximale au modèle, si aucun point ne peut être sélectionné, alors l'énergie qui devait être diffusée ne l'est pas. Elle est

simplement stockée, pour que l'utilisateur ait la possibilité de connaître l'énergie totale perdue, et par suite, si cela est nécessaire, changer certains paramètres de DART pour réduire l'énergie totale perdue.

L'introduction des surfaces opaques a amélioré l'homogénéité radiométrique des surfaces (*Figure II.30*). Ainsi, un plan homogène, isolé et éclairé uniformément présente un aspect quasiment uniforme.

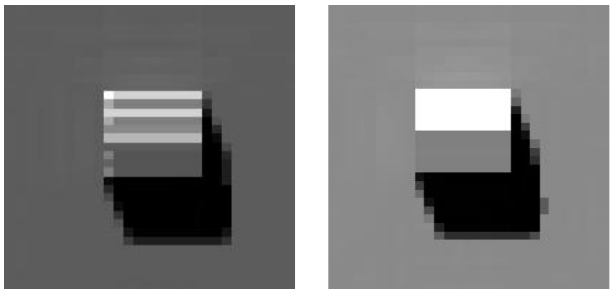


*Figure II.30 : Image d'une maison représentée comme une juxtaposition de cellules pleines (gauche). Image avec la maison représentée avec les figures élémentaires opaques (droite). Éclairage oblique ($\theta_s$=40°,$\varphi_s$=20°) et visée au nadir.*

Certaines hétérogénéités subsistent cependant. Ce sont en particulier les hétérogénéités dues à une mauvaise distribution spatiale de l'éclairement (*Figure II.31*). Cette problématique est décrite par Mathiaud (2000).

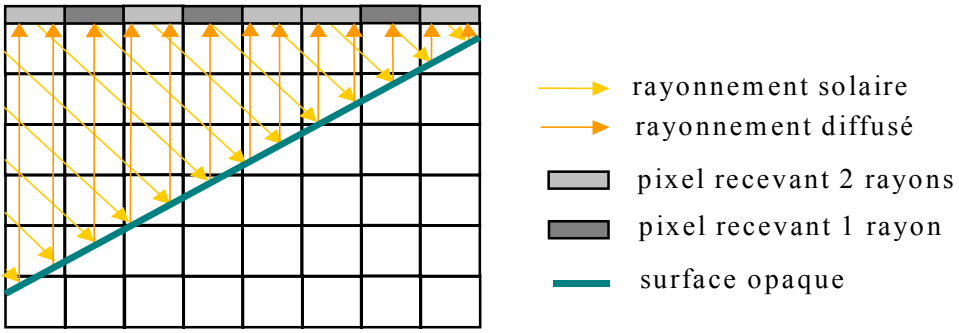



*Figure II.31 : Schéma illustratif des rayons interceptés par un plan et diffusés vers la direction verticale. Le nombre de rayons reçus par la couche fictive diffère selon les cellules, introduisant une hétérogénéité au niveau de l'image générée.*

Pour les cellules de type *Sol*, *Eau* et *Route* le traitement est simplifié du fait que la seule interface est la face supérieure de la cellule. Dans ce cas, le rayonnement est diffusé uniquement depuis le centre de la face (*Figure II.32*).

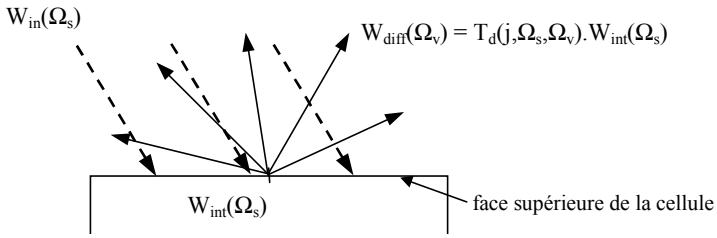



*Figure II.32 : Schéma des mécanismes d'interaction à l'intérieur d'une cellule de type Sol, Eau ou Route.*

L'image d'une surface opaque horizontale est toujours homogène. En effet, la projection des rayons provenant de la surface vers le plan horizontal de projection située en haut du paysage est une bijection entre les cellules et les pixels de la grille d'échantillonnage.

### II.2.3 Test de validation

Il est toujours nécessaire de connaître le domaine de validité et la précision de tout modèle. La précision de DART a déjà été évaluée par Gastellu-Etchegorry *et al.* (1999) dans le cas de couverts forestiers ainsi que dans le cas de l'expérience RAMI (Pinty *et al.*, 2001). Ici, elle est analysée à la fois du point de vue radiométrique et spatial. En effet, un intérêt majeur de DART est de simuler des images. Il est donc intéressant d'évaluer la précision spatiale associée. Pour cela, nous considérons un site urbain complexe dont nous disposons d'images acquises par un capteur aéroporté.

Les images aériennes

Les images concernent la rue Desmouilles de la ville de Toulouse (*Figure II.33*). Elles ont été acquises le 8 juin 2000, par la division QTIS du CNES, dans le cadre des études menées pour la spécification des futurs capteurs à très haute résolution spatiale (Lefèvre-Fonollosa, 2001).

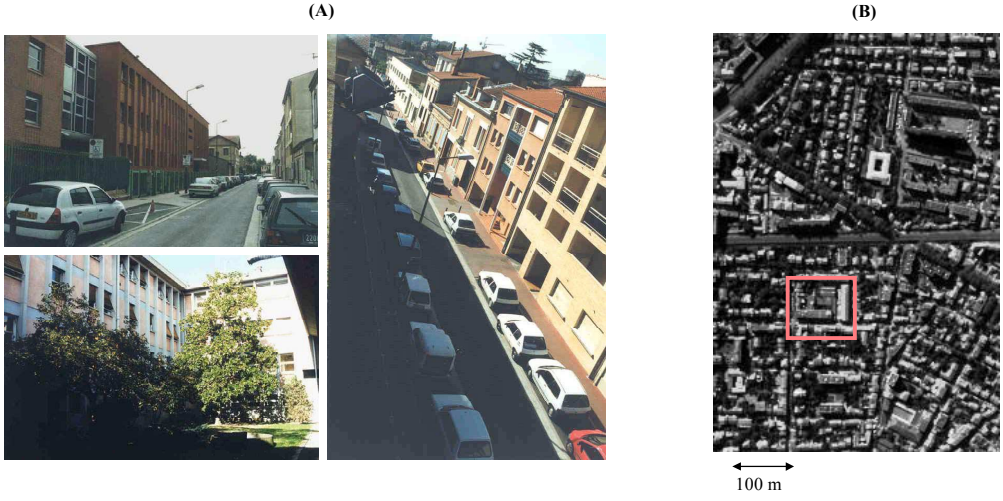



*Figure II.33 : Photos (A) et image aéroportée du site étudié (B).*

Le capteur était une caméra matricielle CCD de 3060*2036 pixels, sensible de 0.4 µm à 1 µm. L'altitude de vol était de 5000m, si bien que la résolution spatiale était d'environ 0.27m. Sept images de la même zone ont été acquises avec plusieurs filtres panchromatiques (*Figure II.34*). Le filtre le plus étroit est le filtre PA (0.5 - 0.7 µm). Le filtre PB0 est une extension du filtre PA vers le bleu jusqu'à 0.45 µm. Les filtres PPIR1, PPIR2, PPIR3 et PPIR4 élargissent progressivement le filtre PA jusqu'à 0.875 µm. Finalement, le filtre PE combine un élargissement vers le bleu et le proche infrarouge (0.45 - 0.875 µm).

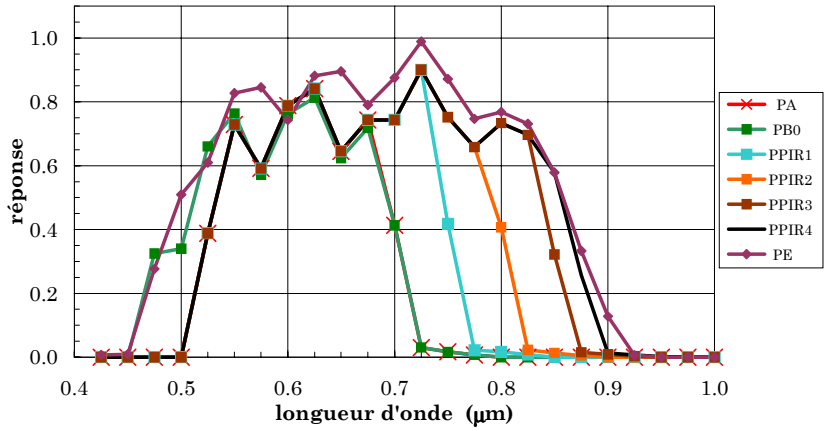



*Figure II.34 : Gabarits des bandes spectrales des filtres panchromatiques.*

L'angle zénithal solaire $\theta_s$ de chaque image aérienne a été calculé avec le modèle 6S (Vermote *et al.*, 1996), compte tenu du lieu, de la date et de l'heure d'acquisition. Entre la première et la dernière des images acquises, cet angle varie de $\theta_s$=54.7° à $\theta_s$=50.7°. Cette variation de $\theta_s$ est perceptible sur les images acquises du fait du déplacement des zones d'ombre. L'analyse des images a porté sur trois transects (A, B et C) (*Figure II.35*) perpendiculaires à la Rue Desmouilles.

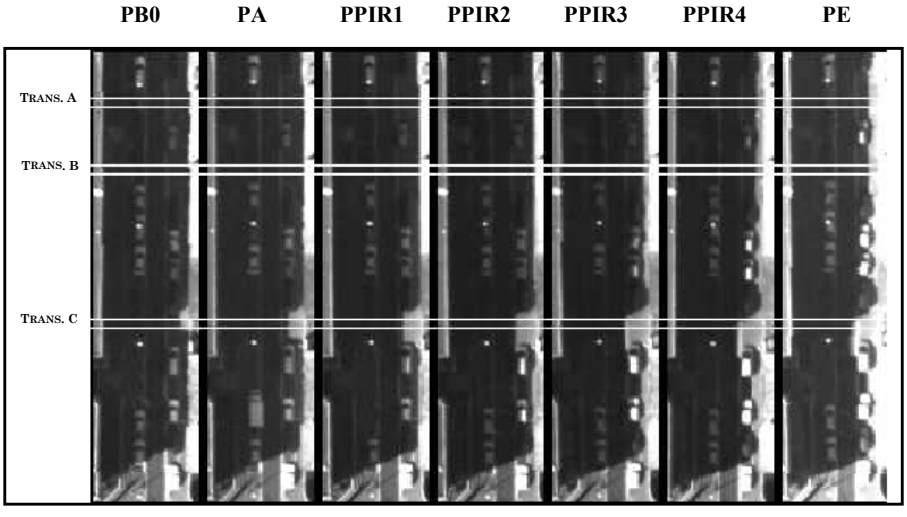


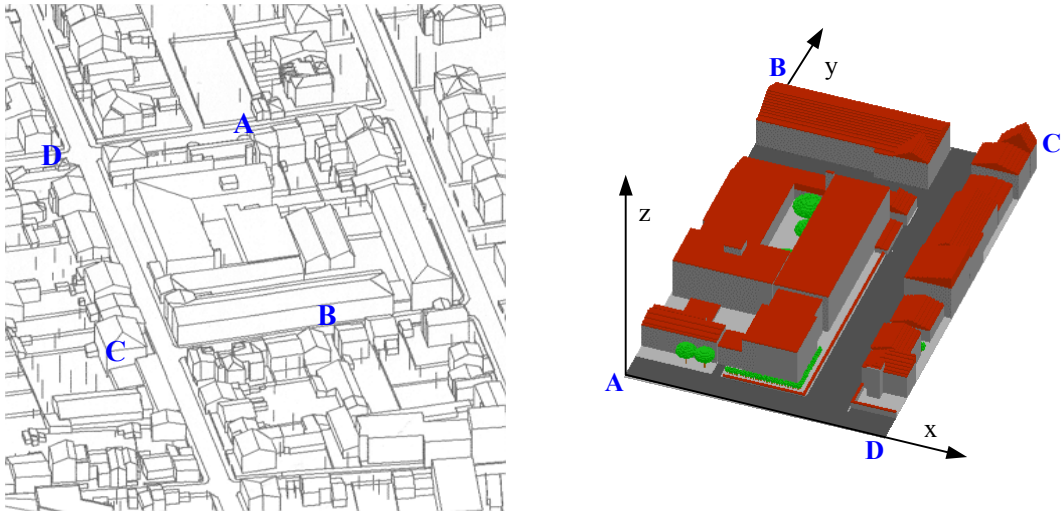

*Figure II.35 : Images aériennes acquises avec 7 filtres de la rue Desmouilles à l'ombre.*

Le transect A contient une route asphaltée bordée par deux bandes étroites bétonnées de 32cm. De droite à gauche, nous avons un trottoir recouvert d'asphalte rouge, une voiture garée, le trottoir gauche, une grille et une zone bétonnée. Le transect B est similaire au transect A à l'exception de la voiture. De même, le transect C est similaire au transect A, avec la présence d'une voiture de teinte foncée.

Les images simulées par DART

Toute simulation d'images de paysage urbain avec le modèle DART requiert la connaissance des propriétés géométriques et optiques de ce paysage, la connaissance de la configuration expérimentale ainsi que l'état de l'atmosphère.

Ici, la géométrie du paysage a été extraite d'une base de données architecturale du service d'urbanisme de la Mairie de Toulouse (*Figure II.36*). Cette description inclut les dimensions des bâtiments et la taille des plus grands arbres.




**(a)** **(b)**

*Figure II.36 : Visualisation 3-D de la base de données urbaines correspondant à la rue Desmouilles. Maquette originale (a). Maquette informatique DART (b).*

Propriétés optiques des éléments

Les réponses spectrales, d'un certain nombre de matériaux contenus dans le site, ont été mesurées avec un spectromètre de terrain (ETA-Optik). Celui-ci comprend une optique d'entrée avec un FOV (Field Of View) de 20° et un jeu de 2 filtres à réseau (de 0.4 à 0.925 µm) qui dispersent le spectre sur une barrette de 512 diodes CCD. Toutes les mesures ont été réalisées avec une configuration de visée au nadir ($\theta_v$=0°) et une configuration d'éclairement avec $\theta_s$ compris selon les cibles entre 27° et 40°. Toutes les

configurations sont en dehors de la configuration spéculaire ($\theta_v=\theta_s$ et $\Delta\varphi=180°$) et la distance entre le spectromètre et la cible était d'environ 1.1m. De ce fait, toute mesure correspond à une tache d'observation d'environ 30 cm de diamètre. Les mesures utilisées ici font partie d'une base de données plus large qui a été élaborée par le CESBIO à la demande du CNES. Les mesures ont été complémentées par des réponses spectrales provenant de la base de données ASTER de la NASA (ASTER, 2001). Les références des signatures spectrales mesurées sont présentées dans le *Tableau II.4 et la Figure II.37*.

| Matériel | Code | Configuration Expérimentale |
|---|---|---|
| Asphalte | ASP-003 (CESBIO) | $\theta_S$=27° et $\theta_V$=0° |
| Asphalte rouge | ASP-001 (CESBIO) | $\theta_S$=28° et $\theta_V$=0° |
| Béton de construction | 0432UUU (ASTER) | |
| Béton rue Desmouilles | BET-001 (CESBIO) | $\theta_S$=30° et $\theta_V$=0° |
| Brique exposée aux intempéries | 0413UUU (ASTER) | |
| Brique rouge | 0097UUU (ASTER) | |
| Brique rue Desmouilles | BRI-001 (CESBIO) | $\theta_V$=0° Éclairement diffus |
| Enduit blanc | PEI-001 (CESBIO) | $\theta_S$=32° et $\theta_V$=0° |
| Gravier | GRA-001 (CESBIO) | $\theta_S$=40° et $\theta_V$=0° |
| Toit rouge | ASP-002 (CESBIO) | $\theta_S$=38° et $\theta_V$=0° |
| Tuiles de terre cuite | 0484UUU (ASTER) | |

*Tableau II.4 : Liste des matériaux utilisés*

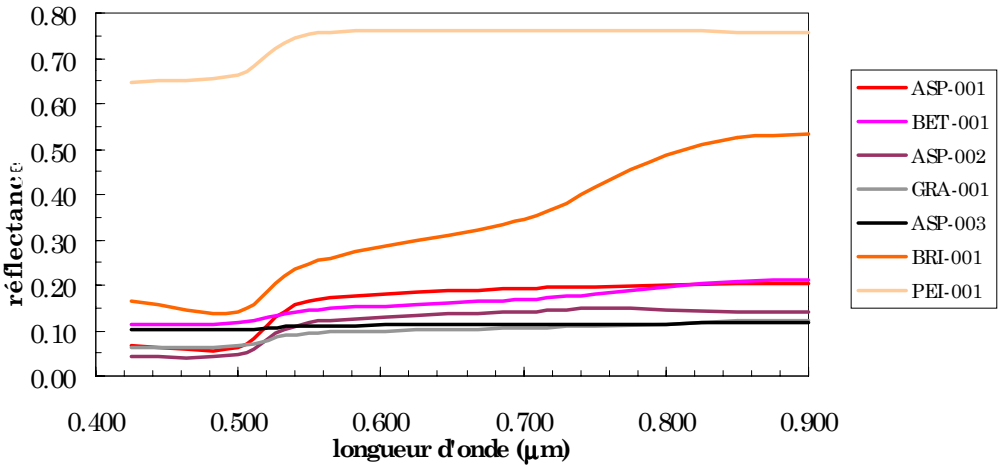
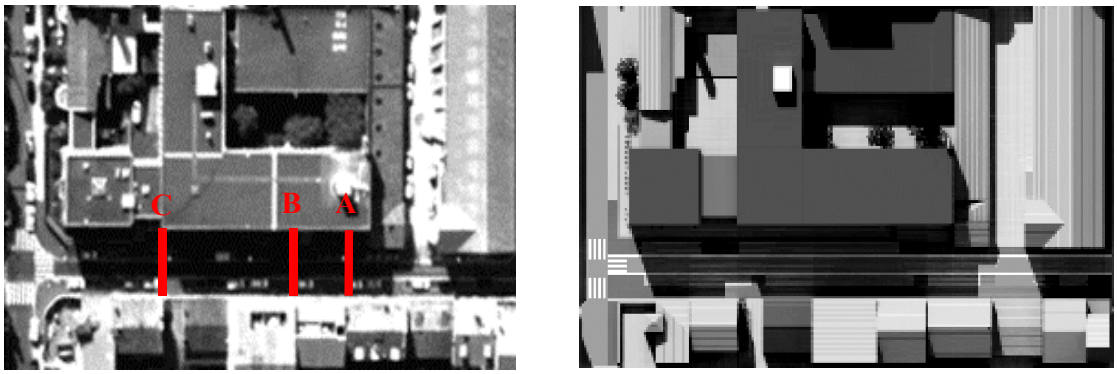



*Figure II.37 : Réponse spectrale des matériaux mesurés.*

Les éléments contenus dans les transects A, B et C sont simulés en utilisant les références : ASP-003 pour la route, 0432UUU pour le béton autour de l'asphalte, ASP-001 pour les trottoirs et BET-001 pour la zone de stationnement le long des trottoirs.

Le fait de prendre un angle zénithal de visée nul ($\theta_v$=0°) est une approximation. En effet, compte tenu de la configuration d'acquisition, les angles zénithaux de visée varient entre 0° et 3.0° (valeur déduite à partir de la distance des pixels du site par rapport au centre de l'image aérienne et de l'altitude de survol).

Toutes les simulations DART sont effectuées avec la direction solaire moyenne : angle zénithal $\theta_s$=53.6° et angle azimutal $\varphi_s$=10.9° (défini par rapport au repère de la *Figure II.38)*. L'erreur induite sur les luminances spectrales des surfaces à l'ombre est inférieure à 2% en relatif dans le domaine spectral considéré. L'atmosphère du jour d'acquisition est simulée avec le logiciel 6S en considérant une atmosphère de latitude moyenne en été avec un modèle d'aérosols de type urbain et une visibilité de 15 km. Compte tenu de la largeur spectrale des filtres et de la variabilité spectrale des éléments du paysage urbain, toute image DART résulte de la combinaison de 9 images de bandes spectrales fines spectralement contiguës et pondérées par la réponse spectrale du filtre du capteur.
La *Figure II.38* présente un exemple d'image aérienne et simulée du site étudié.




*(a)* *(b)*

*Figure II.38 : Image aérienne (a) du site urbain, avec indication des transects A, B et C. Simulation DART associée (b).*

Comparaison mesures-simulations

Pour le transect A, les luminances simulées et mesurées évoluent de manière assez similaire en fonction du filtre utilisé (*Figure II.39*). Certaines divergences méritent cependant d'être précisées. Ainsi, les luminances simulées des pixels asphalte augmentent avec les filtre pris dans l'ordre "PB0, PA, PPIR1, PPIR2, PE, PPIR3, PPIR4". Pour les mesures l'ordre est légèrement différent : "PB0, PA, PPIR1, PE, PPIR2, PPIR4, PPIR3". Les luminances équivalentes mesurées et simulées avec les filtres PB0 et PA sont similaires. Les luminances simulées avec le filtre PE sont uniquement

supérieures à celles des filtres PPIR3 et PPIR4. Nous constatons aussi une classification différente en ce qui concerne l'ordre des filtres pour un élargissement progressif vers le PIR (de PPIR1 à PPIR4). Les fortes luminances des pixels 47, 48 et 49 des mesures sont dues à l'éclairement solaire du trottoir pour les dernières acquisitions. Pour les simulations la configuration moyenne utilisé n'éclaire pas directement le trottoir.

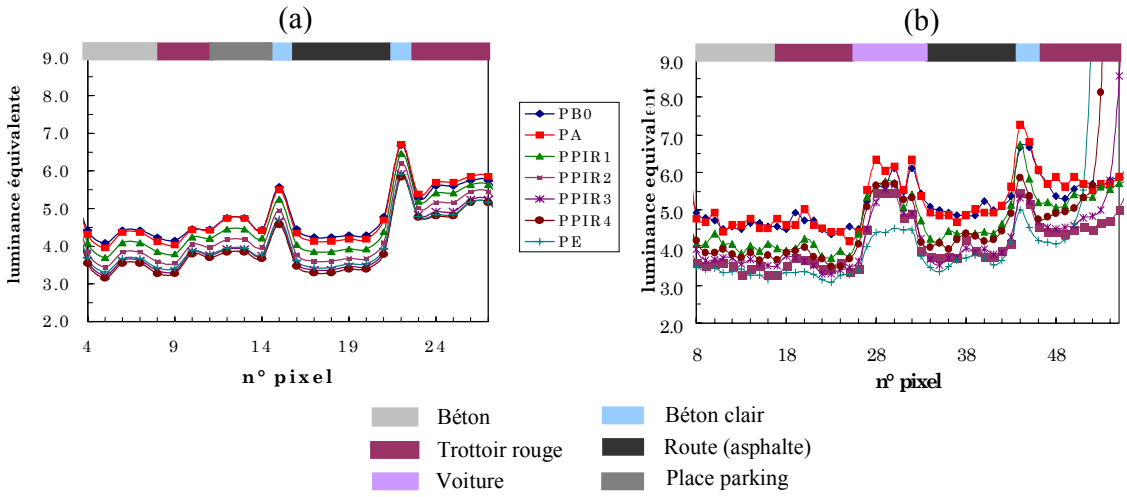



*Figure II.39 : Transect A. Simulation DART (a) avec la luminance équivalente en W/m²/sr/µm. Mesures (b) avec la luminance équivalente en unité arbitraire.*

Le contraste (ou différence entre deux mesures de luminance) entre les niveaux simulés (*Tableau II.5*) et mesurés (*Tableau II.6*) de luminance équivalente de la route et du trottoir droit diminue quand on passe du filtre panchromatique standard (PA) au filtre élargi vers le bleu (PB0). Cette tendance ne survient pas lors de l'élargissement vers le proche infrarouge : les mesures donnent une diminution du contraste alors que les simulations indiquent une augmentation du contraste. Il est surprenant que le contraste mesuré diminue, car celui des courbes spectrales utilisées (ASP-003 et ASP-001) augmente quand le domaine spectral s'étend vers le proche infrarouge. Plusieurs explications peuvent être données : effet d'environnement, courbes spectrales inadaptées, etc. Dans le cas d'un élargissement à la fois vers le bleu et le proche infrarouge (PE), le contraste diminue à la fois pour les simulations et les mesures.

| Contraste / Contraste avec filtre PA (%) | PB0 | PA | PPIR1 | PPIR2 | PPIR3 | PPIR4 | PE |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Asphalte – Trottoir droit | 85% | 100% | 103% | 106% | 107% | 106% | 97% |

*Tableau II.5 : Contraste simulé entre l'asphalte de la route et le trottoir droit.*

| Contraste / Contraste avec filtre PA (%) | PB0 | PA | PPIR1 | PPIR2 | PPIR3 | PPIR4 | PE |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Asphalte – Trottoir droit | 68% | 100% | 95% | 66% | 83% | 83% | 74% |

*Tableau II.6 : Contraste mesuré entre l'asphalte de la route et le trottoir droit.*

Les écarts relatifs des luminances mesurées et simulées de l'asphalte (*Tableau II.7*) sont similaires. Comme déjà indiqué, l'écart entre les niveaux des filtres PA et PB0 est faible. L'écart entre les filtres PE et PPIR4 est aussi relativement faible. Il est intéressant de noter l'impact de l'environnement. Ainsi, le fait d'annuler la réflectance de bâtiments voisins ($\rho_{bât}=0$) entraîne de fortes variations des luminances qui sont nettement supérieures aux différences entre mesures et simulations. Ceci illustre la difficulté de comparer très précisément des mesures et des simulations.

Pour les transects C et B, les tendances des luminances et du contraste trottoir-asphalte sont similaires à celles observées dans le Transect A (*Figures II.40*).

| | $L_{PBO} - L_{PA}$ | $L_{PE} - L_{PPIR4}$ | $L_{max} - L_{min}$ |
|---|---|---|---|
| *Mesures* | *4.08 %* | *10.03 %* | *23.33 %* |
| Simulations | 2.28 % | 3.20 % | 20.15 % |
| Simulations avec une réflectance de l'environnement nulle | 14.68 % | 10.57 % | 39.55 % |

*Tableau II.7 : Évolution de la distance relative entre luminances ($(L_1-L_2)/L_{max}$) entre les valeurs mesurées pour l'asphalte de la route.*

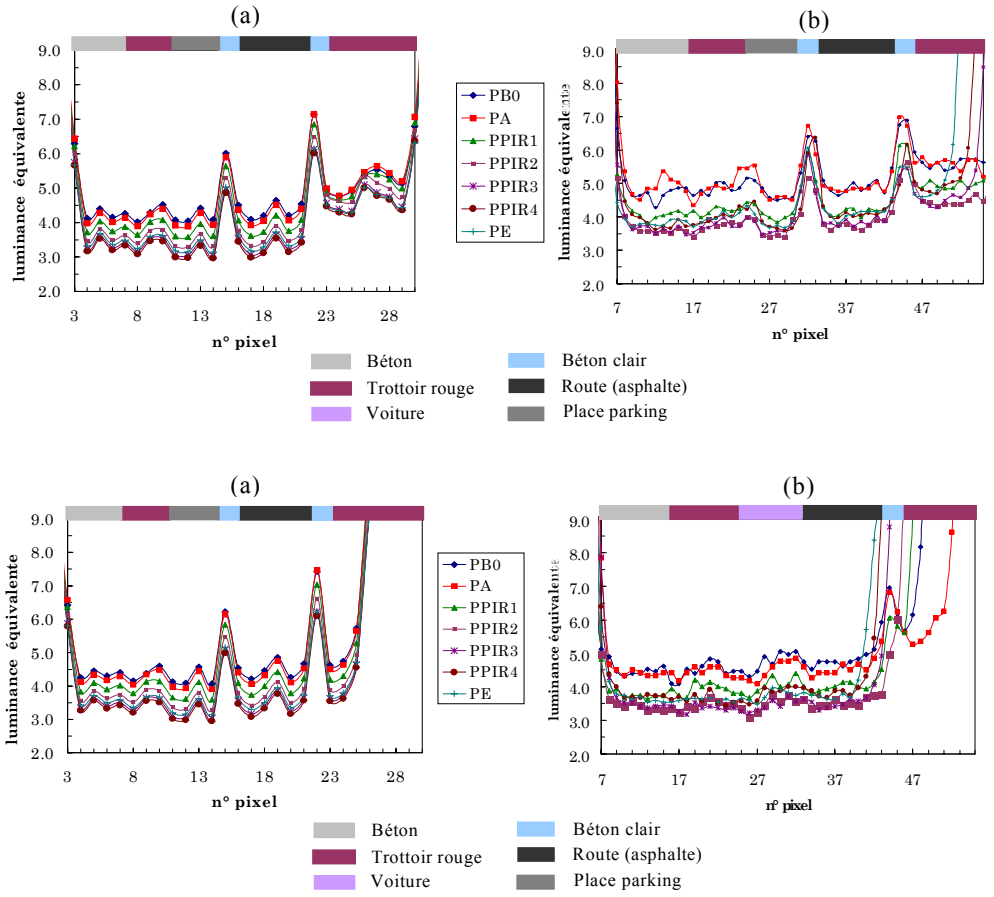



*Figure II.40 : Transect B (dessus) et C(dessous). Simulation DART (a) avec la luminance équivalente en W/m²/sr/µm. Mesures (b) avec la luminance équivalente en unité arbitraire.*

Ce travail montre la capacité du modèle DART à simuler précisément des images aériennes d'un site urbain. En effet, les différences entre les mesures et les simulations sont de l'ordre de grandeur du "bruit" associé à l'effet d'environnement, c'est à dire un effet très difficilement quantifiable sans recourir à des mesures terrain exhaustives.

## II.3 Conclusion

Le modèle DART utilise les cellules dites "turbides" et "opaques" afin de distinguer respectivement la diffusion volumique, associée aux cellules de végétation et d'air, et la diffusion de surface, liée aux murs, toits, sol, etc.

L'expérience RAMI a mis en évidence des différences notables entre DART et trois autres modèles de la communauté scientifique (Flight de North (1996), Sprint de Thompson et Goel (1998) et Raytran de Govaerts et Verstraete (1998)) au niveau de la simulation de paysages naturels hétérogènes. En effet, l'écart maximal relatif entre les réflectances moyennes du site étudié allait jusqu'à 11% dans le proche-infrarouge. Ces différences étaient principalement dues aux nombreuses hypothèses simplificatrices réalisées pour la modélisation des cellules "turbides" de végétation. Nous avons donc décidé de redéfinir les hypothèses faites à trois niveaux : la prise en compte de l'anisotropie du rayonnement incident dans une cellule, la position du barycentre énergétique et la position du point d'origine des rayons diffusés. Ces améliorations ont permis de réduire les écarts par rapport aux autres modèles tout en préservant les temps de calcul et les contraintes de mémoire. Ainsi, l'écart relatif maximal pour la pire configuration est passé de 11.1% à 3.2%.

Pour ce qui est des surfaces opaques, la modélisation développée améliore à la fois la précision radiométrique et la souplesse pour la génération de paysages divers. Néanmoins, la solution apportée est susceptible d'être encore améliorée, notamment au niveau de l'homogénéité du rayonnement projeté sur le plan de l'image. La modélisation des surfaces opaques a été testée en comparant des images réelles avec des simulations pour un site urbain et en utilisant plusieurs filtres spectraux. Les résultats sont satisfaisants au niveau des variations relatives des niveaux radiométriques en utilisant les différents filtres. Ce test de validation a montré la difficulté d'obtenir des mesures terrain exhaustives et précises.

# III MODÉLISATION DU TRANSFERT RADIATIF DANS L'ATMOSPHÈRE

Les niveaux radiométriques des images de télédétection optique dépendent non seulement des caractéristiques optiques et géométriques du paysage terrestre mais aussi des propriétés optiques de l'atmosphère. Le couplage radiatif à l'interface du paysage terrestre et de l'atmosphère (système "paysage-atmosphère") implique que toute simulation précise d'images de télédétection ne puisse être obtenue qu'avec une modélisation simultanée du transfert radiatif dans l'atmosphère et dans les paysages terrestres.

Les modèles actuels qui simulent avec précision l'atmosphère ( MODTRAN (Berk *et al.*, 1989), MOSART (Cornette *et al.*, 1994), (Liang et Strahler, 1995), 6S (Vermote *et al.*, 1996), AMARTIS (Miesch, 1999) et MYSTIC (Mayer *et al.*, 2001)) utilisent des hypothèses très simplificatrices quant à la représentation du paysage terrestre. Ainsi, les modèles MODTRAN et 6S fonctionnent uniquement avec des paysages terrestres plats, dépourvus d'éléments complexes (e.g. forêts, montagnes, villes, etc.). Le modèle de "Liang et Strahler" est limité à la simulation des paysages naturels horizontalement homogènes et ne prend pas en compte la simulation du relief. Les modèles MOSART, AMARTIS et MYSTIC traitent uniquement une surface lisse avec relief. Cette limitation est particulièrement contraignante pour la simulation d'images à très haute résolution spatiale (de l'ordre du mètre).

L'alternative à la modélisation du transfert radiatif dans le système "paysage-atmosphère" est de coupler un modèle de transfert radiatif atmosphérique avec un modèle de transfert radiatif du paysage terrestre. Cette approche a été testée dans le cadre de cette thèse en associant les modèles DART et 6S (Gascon *et al.*, 2001). Les résultats obtenus ont mis en évidence deux limitations majeures :

(1) L'absence de l'air enveloppant le paysage terrestre est une source d'erreurs dans le cas de zones étendues avec des fortes dénivelés.

(2) La non prise en compte de l'hétérogénéité de la distribution spatiale de l'éclairement rétro-diffusé par l'atmosphère (rayonnement qui après avoir été diffusé par le paysage est diffusé à nouveau par l'atmosphère vers le paysage).

À ces limitations, se rajoute la complexité de gérer des modèles a priori non conçus pour fonctionner ensemble.

Après un rappel de la physique liée au transfert radiatif atmosphérique (Lenoble, 1993), ce chapitre décrit l'approche adoptée pour simuler le transfert radiatif dans l'atmosphère et son couplage avec le paysage terrestre. Finalement, la dernière partie du chapitre présente les travaux réalisés pour tester la validité de l'approche développée. Pour cela, des simulations de DART sont comparées aux simulations d'autres modèles existants. Cette validation est restreinte par les contraintes imposées au niveau de la représentation du paysage terrestre par les autres modèles.

## III.1 Propriétés optiques de l'atmosphère

Les gaz et les aérosols atmosphériques affectent le rayonnement solaire lors de sa propagation dans l'atmosphère. Les mécanismes d'interaction onde-matière mis en jeu sont de type résonant (absorption, émission) et non résonant (diffusion). Ces mécanismes sont de nature tridimensionnelle et interdépendants. Ils dépendent du rayonnement et de l'atmosphère. Les principaux paramètres sont la longueur d'onde (λ) pour le rayonnement, alors que pour l'atmosphère il s'agit surtout des variables d'état (pression et température) et des propriétés optiques de ses constituants (gaz et aérosols).

Au sommet de l'atmosphère terrestre, le rayonnement descendant provient de l'émission thermique solaire. Il correspond approximativement à l'émission d'un corps noir à 5900 K. Son domaine spectral est donc surtout celui de l'ultraviolet (UV), du visible (VIS), du proche infrarouge (PIR) et du moyen infrarouge (MIR).

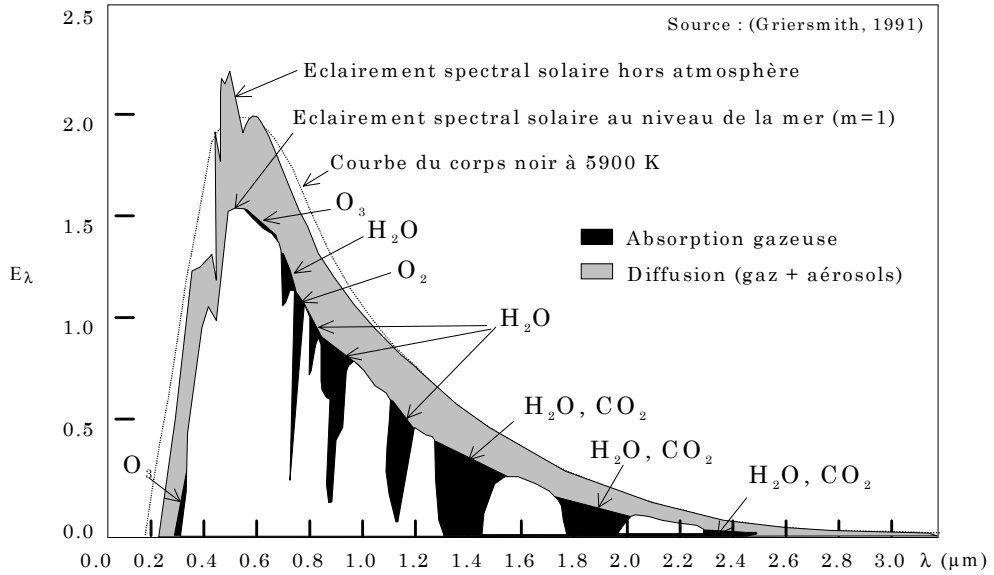



*Figure III.1 : Eclairement solaire ($E_\lambda$) en haut et en bas de l'atmosphère ($kW.m^{-2}.\mu m^{-1}$) sur tout le spectre du rayonnement solaire.*

La *Figure III.1* illustre la diminution du rayonnement solaire du sommet au bas de l'atmosphère, en raison des mécanismes d'absorption (zone noire) et de diffusion (zone grise) dus aux gaz et aérosols atmosphériques. Elle illustre aussi la forte variabilité spectrale de l'absorption gazeuse, contrairement, à la diffusion, dont l'influence diminue régulièrement avec la longueur d'onde.

### III.1.1 Constituants de l'atmosphère

Les gaz

Les principaux gaz de l'atmosphère terrestre sont l'azote ($N_2$) avec 78% de concentration volumique, l'oxygène ($O_2$) avec 21%, l'argon (Ar) avec environ 1%, la vapeur d'eau ($H_2O$), le dioxyde de carbone ($CO_2$) et l'ozone ($O_3$). Leurs profils de concentration dépendent de la saison et du lieu. Leur composition relative est à peu près constante jusqu'à 100 km d'altitude. En effet, la distribution des gaz est régie par des flux turbulents de matière soumis à la force de gravité. En l'absence de ce phénomène de convection, les gaz les plus lourds seraient concentrés aux basses altitudes. Néanmoins, une stratification des gaz intervient pour ceux sujets aux réactions photo-chimiques (*e.g.*, $O_3$). La vapeur d'eau est par contre très variable dans l'espace et le temps. Elle est essentiellement concentrée dans les basses couches atmosphériques. Sa concentration totale $U_{H_2O}$ ($g.cm^{-2}$) est souvent exprimée en tant que masse d'eau, mesurée en grammes, sur une colonne atmosphérique de 1 $cm^2$ de section.

$$U_{H_2O} = \int_0^{\infty} \rho_v(z).dz \qquad (g.cm^{-2}) \tag{3.1}$$

où $\rho_v$ est la masse volumique ($g.cm^{-3}$).

Le contenu total d'ozone $U_{O_3}$ est généralement exprimé en cm.atm, ce qui correspond à une intégration de la pression partielle $P_{O_3}$ (atm) sur une colonne d'atmosphère :

$$U_{O_3} = \int_0^{\infty} P_{O_3}(z).dz \quad (cm.atm) \tag{3.2}$$

En première approximation, l'hypothèse d'une atmosphère isotherme explique que les profils de pression P(z) (Pa), de masse volumique $\rho(z)$ ($g.m^{-3}$) et de concentration D(z) (molécules.$m^{-3}$) diminuent exponentiellement avec l'altitude z :

$$P(z) = P(0).\exp[\frac{-z}{H_m}] \qquad \rho(z) = \rho(0).\exp[\frac{-z}{H_m}] \qquad D(z) = D(0).\exp[\frac{-z}{H_m}] \tag{3.3}$$

Où $H_m$ est le facteur d'échelle de hauteur. La valeur de ce facteur est de l'ordre de 8.4 km, pour une atmosphère moyenne et pour les principaux gaz à l'exception de la vapeur

d'eau et de l'ozone. Pour la vapeur d'eau, $H_m$ est plus faible et très dépendant du lieu et de la saison. Il est très élevé pour une atmosphère tropicale humide et très faible pour une atmosphère arctique sèche. L'ozone ne présente pas une distribution exponentielle. Sa concentration est maximale autour de 20-25 km d'altitude.

Les aérosols

Les aérosols sont des particules solides et liquides en suspension dans l'air (*e.g.*, brume, fumée). Ils ont des dimensions généralement comprises entre 0.1 et 10 μm et leur profil de densité est supposé exponentiel $D(z) = D(0).\exp[\frac{-z}{H_p}]$ .

Leur facteur d'échelle de hauteur $H_p$ dépend de leur taille, avec des valeurs de l'ordre de 1 km pour les grandes particules et de 3 km pour les petites particules. Leurs principales origines sont de type :

- *Terrestre* : Résultat de l'érosion éolienne des surfaces terrestres.
- *Océanique* : Gouttelettes d'eau que l'évaporation peut transformer en sel.
- G*azeuse* : Émissions industrielles, feux de forêts, volcans, etc.

### III.1.2 Mécanismes d'interaction onde-matière dans l'atmosphère

Trois mécanismes majeurs régissent la plupart des interactions onde-matière dans l'atmosphère : l'absorption, la diffusion et l'émission. Dans le domaine spectral étudié (0.3μm–3μm), l'émission peut être négligée. Par conséquent, seuls les phénomènes d'absorption et de diffusion sont considérés ici.

Absorption

Tout volume atmosphérique absorbe partiellement l'onde qui le traverse. Ce phénomène est essentiellement résonant, si bien qu'il peut être négligeable ou très fort selon le spectre de l'onde et la composition du milieu. Le spectre de l'absorption résulte de la superposition, juxtaposition et étalement des nombreuses raies d'absorption gazeuses (*Figure III.2*).

Les variations de la largeur naturelle des raies sont essentiellement liées aux niveaux de température et de pression locales. L'absorption résonante d'une onde par une molécule gazeuse correspond à un transfert partiel ou total de l'énergie de l'onde à la molécule. L'énergie interne de cette molécule augmente alors de niveau quantique. Ensuite, la molécule peut revenir à un niveau d'énergie inférieur par émission spontanée ou induite d'un photon (*i.e.*, émission thermique) ainsi que par l'intermédiaire de processus collisionnels.

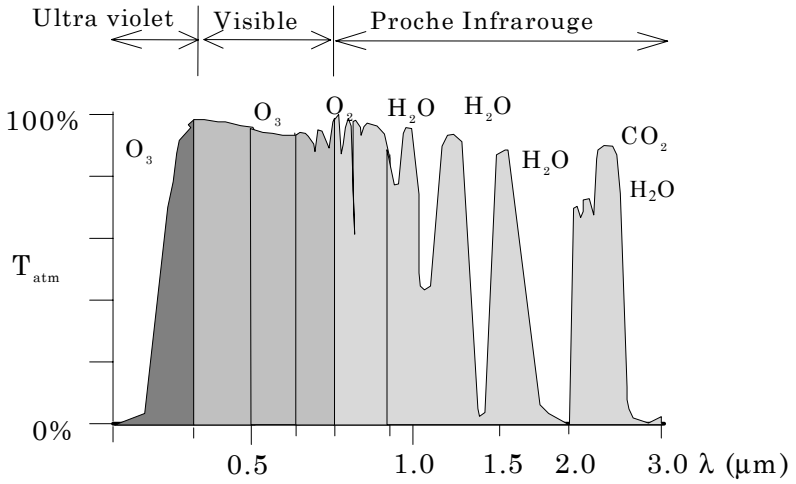



*Figure III.2 : Bandes de transmission atmosphérique (Griersmith, 1991).*

Dans le domaine traité (de 0.3 µm à 3 µm) les principaux gaz absorbants sont :

- *Vapeur d'eau* ($H_2O$) : Ce gaz est souvent le principal absorbant alors qu'il ne représente qu'une très faible fraction de l'atmosphère. Ses bandes d'absorption sont à 0.94µm, 1.13µm et surtout à 1.38 µm, 1.87 µm et 2.7 µm.
- *Gaz carbonique* ($CO_2$) : Il est responsable de plusieurs bandes d'absorption dans le proche infrarouge (1.46 µm, 1.60 µm, 2.04 µm et 2.75 µm).
- *Ozone* ($O_3$) : L'ozone de la haute atmosphère empêche le rayonnement ultraviolet entre 0.22µm et 0.3µm d'atteindre la Terre (bande de Hartley). Ce gaz donne aussi des bandes d'absorption plus faibles entre 0.3 µm et 0.36 µm (bande de Huggins) et entre 0.55 µm et 0.65 µm (bande de Chappuis).
- *Oxygène* ($O_2$) : Il absorbe beaucoup les UV ($\lambda < 0.25$ µm). Il est caractérisé par une forte bande de 0.22 µm à 0.3 µm et deux faibles raies à 0.69 µm et 0.76 µm.

Diffusion

Alors que l'absorption correspond à une disparition du rayonnement incident intercepté sous forme d'énergie interne, la diffusion sans absorption correspond à une redistribution dans l'espace du rayonnement intercepté.

Le mécanisme de diffusion des particules est expliqué par la théorie de Mie (Stratton, 1941). Celle-ci est basée sur les équations de Maxwell combinées aux conditions aux limites de particules sphériques.

Selon la taille des particules, on distingue trois types de diffusion :

- *Diffusion de Rayleigh* : Cette diffusion est surtout due aux molécules des gaz les plus présents, c'est à dire les molécules d'oxygène et d'azote. La diffusion de Rayleigh décroît fortement avec la longueur d'onde, selon une loi en $\lambda^{-4}$. Par suite, le rayonnement dans le bleu est beaucoup plus diffusé par l'atmosphère que les rayonnements de plus grande longueur d'onde comme le rouge. Pour $\lambda > 1\mu m$ la diffusion de Rayleigh est souvent négligée.
- *Diffusion de Mie* : Son intensité n'est significative que pour le rayonnement dont la longueur d'onde est de l'ordre de la dimension des particules. Dans le domaine optique, elle est donc due aux aérosols. Par rapport à la diffusion de Rayleigh, son impact est en général moindre pour $\lambda < 0.4$ μm et prédominant pour $\lambda > 0.5$ μm. D'autre part, la diffusion de Mie est beaucoup plus anisotrope que la diffusion de Rayleigh et son intensité décroît moins rapidement avec la longueur d'onde.
- *Diffusion non sélective* : Les particules de taille supérieure à la longueur d'onde tendent à diffuser de la même manière à toutes les longueurs d'onde. Ainsi, la couleur grise des nuages est due à la diffusion par les gouttelettes d'eau.

### III.1.3 Modélisation d'un volume d'air

Définitions

Les propriétés optiques d'un volume d'air sont liées à la concentration D (particules/$m^3$) et aux propriétés optiques des particules qu'il contient. Elles sont souvent représentées par des sections efficaces d'extinction $\sigma^e$ (absorption + diffusion), de diffusion $\sigma^d$, d'absorption $\sigma^a$ ($m^2$/particule) et par les fonctions de phase $P(\Omega_i, \Omega_o)$ des particules. La théorie de Mie permet d'obtenir une expression analytique des sections efficaces d'extinction ($\sigma^e$) et de diffusion ($\sigma^d$) des gaz et des aérosols, ainsi que de leurs fonctions de phase à partir du rayon $r_p$ et de l'indice de réfraction n des particules.

Dans les bandes spectrales utiles pour l'observation de la Terre depuis l'espace, les mécanismes d'absorption et de diffusion des gaz et des aérosols sont relativement découplés. Ainsi, au niveau de tout volume atmosphérique élémentaire et pour chaque longueur d'onde, les propriétés optiques sont généralement supposées être des combinaisons linéaires des sections efficaces et fonctions de phase des éléments compris dans ce volume (Lenoble, 1993) :

*Coefficient d'extinction par diffusion* : $\alpha^d(z) = \alpha_m;^d + \alpha_p;^d$, où $\alpha_m;^d = D_m(z).\sigma_m;^d(z)$ et $\alpha_p;^d = D_p(z).\sigma_p;^d(z)$

*Coefficient d'extinction par absorption* : $\alpha^a(z) = \alpha_m;^a + \alpha_p;^a$, où $\alpha_m;^a = D_m(z).\sigma_m;^a(z)$ et $\alpha_p;^a = D_p(z).\sigma_p;^a(z)$

*Coefficient d'extinction* : $\alpha^e(z) = \alpha_m;^e + \alpha_p;^e$

$\alpha_m;^e = D_m(z).\sigma_m;^e(z) = \alpha_m;^a + \alpha_m;^d$ et $\alpha_p;^e = D_p(z).\sigma_p;^e(z) = \alpha_p;^a + \alpha_p;^d$

*Fonction de phase* : $$P(\Omega_i,\Omega_o) = \frac{\alpha_m;^d.P_m(\Omega_i,\Omega_o) + \alpha_p;^d.P_p(\Omega_i,\Omega_o)}{\alpha_m;^d + \alpha_p;^d}$$

Les indices (m) et (p) sont respectivement liés aux molécules gazeuses et aux particules solides et liquides (*i.e.,* les aérosols). Le fait de négliger les diffusions multiples à l'intérieur d'un élément de volume atmosphérique permet de considérer la fonction de phase d'un élément de volume atmosphérique comme une combinaison linéaire des fonctions de phase des molécules $P_m(\Omega_i, \Omega_o)$ et des aérosols $P_p(\Omega_i , \Omega_o)$, pondérées par leurs coefficients d'extinction respectifs $\alpha_m;^e$ et $\alpha_p;^e$.

La transmittance directe (T) d'un trajet $\Delta r$ atmosphérique, *i.e.* la probabilité de non-interception, est égale à :

$$T = e^{-\tau(\Delta r)} \qquad \text{où} \qquad \tau(\Delta r) = \int_{\Delta r} \sigma^e(r).D(r).dr \tag{3.4}$$

La transmittance directe de l'atmosphère selon une direction d'angle zénithal $\theta$ est donc $e^{-\tau(\Delta r)/|\cos\theta|}$ où $\Delta r$ est le chemin vertical entre le sol et l'espace extérieur. Les coefficients d'extinction total, par absorption et diffusion ($\alpha_m;^e$, $\alpha_m;^a$ , $\alpha_m;^d$ , $\alpha_p;^e$ , $\alpha_p;^a$ , $\alpha_p;^d$) intégrés sur un chemin, définissent les épaisseurs optiques associées : $\tau_m$ , $\tau_m;^a$ , $\tau_m;^d$ , $\tau_p$ , $\tau_p;^a$ et $\tau_p;^e$ .

<u>Modélisation des gaz</u>

La diffusion gazeuse est associée à la diffusion de Rayleigh. L'épaisseur optique de diffusion est souvent calculée à partir de l'approximation suivante :

$$\tau_m;^d \approx \sigma_m;^d(\lambda).D_{tot} = \frac{6.3}{\lambda^4}\,10^{-3} \tag{3.5}$$

Où la section efficace de diffusion est calculée par $\sigma_m;^d \approx 3.10^{-32}/\lambda^4\ m^2$ ($\lambda$ en µm) et que le nombre total de "molécules air" est $D_{tot} = P(0)/(M_m.g) \approx 2.1\ 10^{29}\ m^{-2}$, où P(0) est la pression atmosphérique sur Terre et $M_m$ est la masse moyenne d'une molécule d'air ($\approx 4{,}8.10^{-26}$ kg).

La fonction de phase des gaz $P_m(\Omega_i,\Omega_o)$ ne dépend que de l'angle de phase $|\Psi_{i,o}|$, *i.e.* l'angle entre les directions de diffusion $\Omega_o$ et d'incidence $\Omega_i$. La fonction de phase des gaz est souvent représentée par la fonction de Rayleigh :

$$P_m(\Psi_{i,o}) \approx \frac{3}{4}\cdot\frac{2(1-\delta)}{2+\delta}.(1+\cos^2(\Psi_{i,o})+\frac{3\delta}{2+\delta} \approx 0.7552+0.7345.\cos^2(\Psi_{i,o}) \Rightarrow P_m(\Psi_{i,o})\approx\frac{3}{4}.(1+\cos^2(\Psi_{i,o})) \quad (3.6)$$

Où $\delta$ est le facteur de dépolarisation qui rend compte de l'anisotropie des molécules. Pour une atmosphère terrestre moyenne $\delta\approx0.0279$ (Young, 1980).

Modélisation des aérosols

Le comportement optique des aérosols est généralement moins bien défini que celui des gaz en raison de la forte variabilité spatio-temporelle de leur nature et de leur concentration. Les mesures satellitales sont beaucoup plus affectées par la quantité totale des aérosols que par le profil vertical des aérosols, car ceux-ci sont généralement concentrés dans les tous premiers kilomètres au-dessus des surfaces terrestres. Il convient de noter que l'humidité atmosphérique affecte beaucoup les coefficients d'extinction et d'absorption des aérosols.

L'efficacité de diffusion des aérosols ( $\sigma_{p;}^{d}/(\pi.r_p{}^{;2})$ ) est d'autant plus faible que le rapport "rayon $r_p$ / longueur d'onde $\lambda$" est faible. Ceci est cohérent avec le fait que leur section efficace de diffusion $\sigma_{p;}^{d}$ varie comme $\lambda^{-m}$ avec m compris entre 0 (si $r_p>>\lambda$ gros aérosols) et 4 (si $r_p<<\lambda$ très petits aérosols). Cette dépendance spectrale explique que l'épaisseur optique $\tau_{p;}^{d}$ est variable en fonction de la longueur d'onde. Elle est souvent déterminée par l'approximation d'Angström : $\tau_{p;}^{d}(\lambda)=\tau_{p;}^{d}(1\mu m).\lambda^{-\beta}$, où le coefficient d'Angström $\beta$ varie de 2.5 (très petits aérosols) à 0 (très gros aérosols). En pratique, la valeur de $\beta$ oscille entre 0.5 et 1.5. On prend souvent $\beta\approx1.3$ comme valeur représentative de l'atmosphère terrestre moyenne.

La fonction de phase des aérosols ($P_p(\Psi_{i,o})$) a une symétrie azimutale pour des particules sphériques. Elle est très fortement anisotrope avec un fort maximum vers l'avant et un faible maximum local pour la rétrodiffusion.

L'albedo de diffusion $\omega_p$ s'exprime à partir des coefficients $\alpha_{p;}^{d}$ et $\alpha_{p;}^{a}$ :

$$\omega_p = \frac{\alpha_{p;}^{d}}{\alpha_{p;}^{d} + \alpha_{p;}^{a}} \quad (3.7)$$

Le milieu est dit conservatif lorsqu'il est non absorbant ($\omega_p$ =1). Pour les aérosols $\omega_p$ vaut entre 0.75 et 1.

Les aérosols atmosphériques ayant des dimensions très diverses, leurs propriétés optiques sont souvent caractérisées par des quantités moyennes. Ainsi, pour un mélange de j types d'aérosols caractérisés par des coefficients de diffusion $\alpha_{d,j}$ et d'extinction $\alpha_{e,j}$ et des fonctions de phase $P_{p,j}(\Psi)$, on a :

- Coefficient de diffusion moyen : $\alpha_d(\lambda) = \sum_j \alpha_{d,j}(\lambda)$ (3.8)
- Albédo moyen : $\omega(\lambda) = \frac{\alpha_d(\lambda)}{\alpha_e(\lambda)}$ (3.9)
- Fonction de phase moyenne : $P_p(\Psi_{i,o}) = \frac{1}{\alpha_d(\lambda)} \sum_j P_{p,j}(\Psi_{i,o})\ \alpha_{d,j}(\lambda)$ (3.10)

## III.2 Modélisation de l'atmosphère dans DART

Le transfert radiatif atmosphérique est modélisé par DART avec les méthodes du suivi de rayons et des ordonnées discrètes. L'approche développée pour l'atmosphère est similaire à celle utilisée pour la modélisation des paysages terrestres (*cf.* I.1). Ainsi, pour les mêmes directions de propagation, un nombre discret de rayons solaires est lancé et suivi à l'intérieur d'une représentation tridimensionnelle du paysage terrestre et l'atmosphère.

### III.2.1 Maquette de l'atmosphère

L'atmosphère est discrétisée en cellules parallélépipédiques appelées cellules *Air*. Le volume d'air à l'intérieur de chaque cellule a des propriétés optiques constantes.

D'autre part, étant donnée la forte concentration de l'atmosphère dans les premiers 100 kilomètres au-dessus de la Terre et les dimensions horizontales (DX et DY) des scènes simulées, petites devant le rayon de la Terre, l'atmosphère est supposée présenter une homogénéité horizontale. Cette approximation permet de représenter l'atmosphère comme une colonne composée de cellules *Air* (maquette répétitive du paysage) simulant l'ensemble de l'atmosphère. Pour minimiser les temps de calcul, le nombre de cellules *Air* doit être le plus faible possible mais doit aussi conserver un niveau de discrétisation suffisant afin de correctement prendre en compte les interactions entre les différentes régions de l'atmosphère. Par conséquent, la représentation informatique de l'atmosphère est une matrice rectangulaire de cellules *Air* dont les dimensions varient avec le profil vertical de matière, c'est à dire avec l'altitude. Toutes les cellules de même altitude présentent donc les mêmes dimensions. L'atmosphère est divisée en trois composantes nommées la basse, la moyenne et la haute atmosphère (*Figure III.3*).

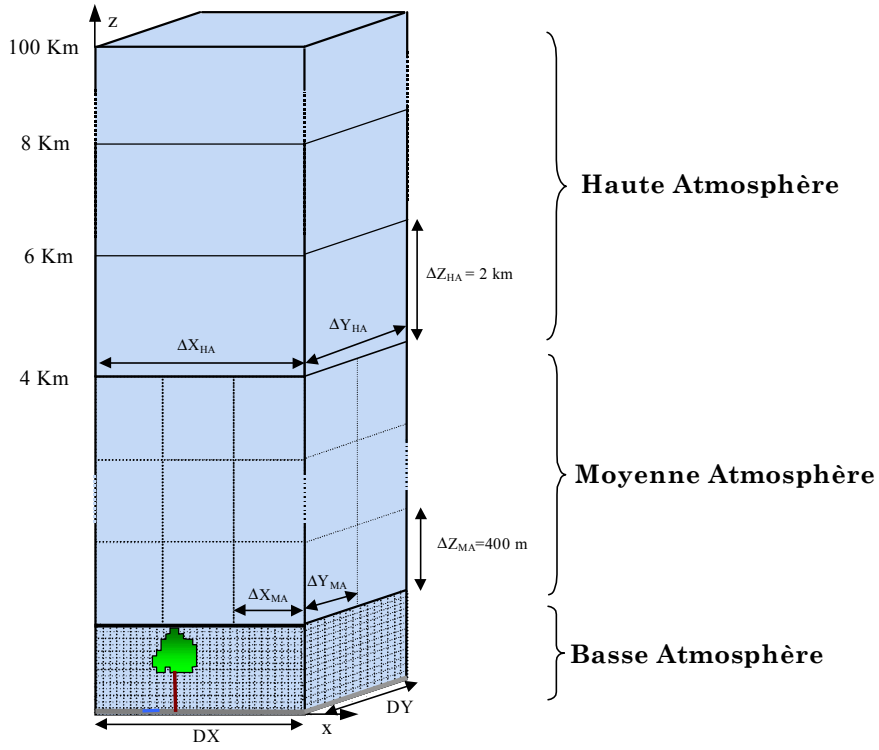



*Figure III.3 : Schéma 3D de la maquette du système paysage-atmosphère.*

Les caractéristiques des trois couches sont :

- *Basse Atmosphère (BA) :* Elle contient l'atmosphère comprise entre le sol et l'altitude maximale du paysage terrestre. Les cellules *Air* ont les mêmes dimensions ($\Delta X_{BA}$, $\Delta Y_{BA}$, $\Delta Z_{BA}$) que les cellules utilisées pour représenter le paysage terrestre ($\Delta X$, $\Delta Y$, $\Delta Z$). La couche BA est nécessaire pour prendre en compte l'air contenu dans le paysage, par exemple dans le cas d'une scène étendue et avec un relief accentué.
- *Moyenne Atmosphère (MA) :* Partie comprise entre la basse atmosphère et une altitude de 4km. Cette altitude est telle que, dans la majorité des conditions de mesure, la moyenne atmosphère génère au moins 80% de l'éclairement atmosphérique de rétrodiffusion. Elle a été calculée en utilisant une "configuration de référence", considérée ici extrême : $\lambda$=450nm, un sol lambertien de réflectance quelconque, $\tau_m$=0.23, $\tau_p$=0.17, $\tau_m$;$^a$=0, $\tau_p$;$^a$=0 $H_m$=8km, $H_p$=2km, $P_m(\Psi_{i,o})$ de Rayleigh et $P_p(\Psi_{i,o})$ de type urbain (selon la définition du modèle 6S). Cette configuration correspond à une atmosphère où la matière présente dans la partie supérieure de l'atmosphère (principalement des gaz) diffusent beaucoup (domaine spectral du bleu). Pour cette "configuration de référence", l'albédo sphérique de la moyenne atmosphère ($s_{MA}$) vaut 82% de l'albédo atmosphérique total ($s_{ATM}$). Dans une autre

configuration (où les paramètres modifiés sont $\lambda$=550nm, $\tau_m$=0.13 et $\tau_p$=0.07) le terme $s_{MA}$ vaut 91.1% de $s_{ATM}$ .

La dimension verticale des cellules Air de la moyenne atmosphère ($\Delta Z_{MA}$) est prédéfinie à 400 m. Cette dimension représente une discrétisation assez fine pour que la précision relative de la réflectance atmosphérique soit meilleure que 0.3%, par rapport à un échantillonnage très fin ($\Delta Z_{MA}$ = 50 m) et pour la "configuration de référence". La discrétisation horizontale de la couche MA permet de simuler la variabilité spatiale du couplage entre le paysage terrestre et l'atmosphère. Les dimensions horizontales ($\Delta X_{MA}, \Delta Y_{MA}$) sont inférieures ou égales à 100 mètres avec la contrainte que les fractions $DX/\Delta X_{MA}$ et $DY/\Delta Y_{MA}$ soient des nombres entiers permettant d'assurer la continuité avec la maquette du paysage terrestre. Les dimensions horizontales des cellules air sont justifiées ultérieurement.

- *Haute Atmosphère (HA) :* Elle s'étend du haut de la moyenne atmosphère jusqu'à 100km, altitude au-dessous de laquelle se trouvent la plupart des constituants atmosphériques. La haute atmosphère a des coefficients d'extinction plus faibles que la moyenne atmosphère. Elle influence peu le rayonnement de couplage et sa variabilité spatiale. Elle est donc simplement constituée par une colonne de cellules d'épaisseur $\Delta Z_{HA}$=2km et de dimensions horizontales ($\Delta X_{HA}$, $\Delta Y_{HA}$) égales à celles de la maquette du paysage terrestre. Comme pour $\Delta Z_{MA}$ , une dimension de 2 km pour $\Delta Z_{HA}$ assure au niveau de la réflectance atmosphérique une erreur inférieure à 0.3% par rapport à la "configuration de référence".

### III.2.2 Caractéristiques des cellules d'air

Étant donné l'atmosphère, essentiellement concentrée dans les premiers kilomètres au-dessus de la Terre et des zones simulées avec DART petites devant le rayon de la Terre, la composition atmosphérique est supposée présenter une homogénéité horizontale. C'est pourquoi, au-dessus du paysage terrestre, les cellules *Air* de même altitude ont des propriétés optiques identiques.

Les mécanismes d'interaction onde-matière (diffusion et absorption) à l'intérieur de l'atmosphère sont simulés avec les méthodes du suivi de rayons et des ordonnées discrètes (Kimes et Kirchner, 1982) à travers des cellules *Air*. Les propriétés optiques de chaque cellule *Air* sont définies par six paramètres:

*4 paramètres variables avec l'altitude :*

- $\alpha_{m;}^{a}(z)$ : Coefficient d'extinction par absorption des gaz.

- $\alpha_{m,}^{d}(z)$ : Coefficient d'extinction par diffusion des gaz.
- $\alpha_{p,}^{a}(z)$ : Coefficient d'extinction par absorption des aérosols.
- $\alpha_{p,}^{d}(z)$ : Coefficient d'extinction par diffusion des aérosols.

*2 paramètres indépendants de l'altitude :*

- $\frac{P_m(\Psi_{i,o})}{4\pi}$ : Fonction de phase des gaz.
- $\frac{P_p(\Psi_{i,o})}{4\pi}$ : Fonction de phase des aérosols.

Dans le cas d'un rayon d'énergie $W_i(\Omega_i)$ incident sur une cellule *Air* et qui effectue un trajet $\Delta l$ dans celle-ci, l'énergie interceptée est (Lenoble, 1993) :

$$W_{int}(\Omega_i) = W_i(\Omega_i).\left[1 - \exp(-(\alpha_{m,}^{a} + \alpha_{m,}^{d} + \alpha_{p,}^{a} + \alpha_{p,}^{d}).\Delta l)\right] \tag{3.11}$$

L'énergie diffusée d'ordre 1 selon la direction $\Omega_o$ s'écrit :

$$W_{diff}(\Omega_i, \Omega_o) = W_{int}(\Omega_i).\left[T_m(\psi_{i,o}).\frac{\alpha_{m,}^{e}}{\alpha_{p,}^{e} + \alpha_{m,}^{e}}.\omega_m + T_p(\psi_{i,o}).\frac{\alpha_{p,}^{e}}{\alpha_{p,}^{e} + \alpha_{m,}^{e}}.\omega_p\right] \tag{3.12}$$

Les albédos de diffusion des molécules ($\omega_m$) et des aérosols ($\omega_p$) sont définis par :

$$\omega_m = \frac{\alpha_{m,}^{d}}{\alpha_{m,}^{a} + \alpha_{m,}^{d}} \qquad \omega_p = \frac{\alpha_{p,}^{d}}{\alpha_{p,}^{a} + \alpha_{p,}^{d}} \tag{3.13}$$

À l'extérieur de la cellule, l'énergie diffusée se propage selon une direction qui a pour origine le centre de la cellule (*Figure III.4*). Le long du chemin $\Delta s$ une partie de l'énergie de $W_o(\Omega_o)$ est ré-interceptée entraînant les diffusions multiples intra-cellule.

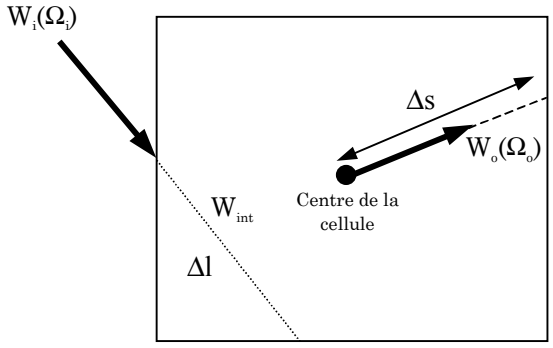



*Figure III.4 : Schéma de l'interception et diffusion des cellules Air.*

Toute cellule est en fait caractérisée par un coefficient d'extinction moyen $\alpha^e$. Par suite, pour toute cellule comprise entre les altitudes $z_1$ et $z_2$, les coefficients d'extinction moyens associés aux gaz et aux aérosols sont définis par :

$$\alpha^e(z_1,z_2) = \frac{\tau^e}{(z_2-z_1)}.\left[\exp\left(\frac{-z_2}{H}\right) - \exp\left(\frac{-z_1}{H}\right)\right] \quad (3.14)$$

Où $\tau^e$ est l'épaisseur optique totale depuis l'altitude 0km et H le facteur d'échelle.

Dans le modèle DART, la fonction de phase des gaz est celle de Rayleigh (*cf.* § III.1.3), pour une atmosphère moyenne avec le facteur de dépolarisation $\delta \approx 0.0279$ (Young, 1980):

$$P_m(\Psi_{i,o}) \approx 0.7552 + 0.7345.\cos^2(\Psi_{i,o}) \quad (3.15)$$

En raison de son anisotropie, la fonction de phase des aérosols ne peut être approchée par une seule fonction de Henyey-Greenstein (Lenoble, 1993), surtout si la contribution des aérosols est importante. En effet, il est impossible de simuler le maximum local de rétrodiffusion avec une fonction continue et décroissante dans l'intervalle $\Psi_{i,o}=[0,180]$. Par conséquent, le modèle DART représente la fonction de phase des aérosols par la somme pondérée de 2 fonctions de Henyey-Greenstein :

$$P_p(\Psi_{i,o}) = \frac{a_p.(1-g_{1p}^2)}{\left[1+g_{1p}^2-2g_{1p}.\cos(\Psi_{i,o})\right]^{1.5}} + \frac{(1-a_p).(1-g_{2p}^2)}{\left[1+g_{2p}^2-2g_{2p}.\cos(180-\Psi_{i,o})\right]^{1.5}} \quad (3.16)$$

Le paramètre $a_p$ et les facteurs d'asymétrie $g_{1p}$ et $g_{2p}$ dépendent de la distribution en taille (r) des aérosols et de la longueur d'onde.

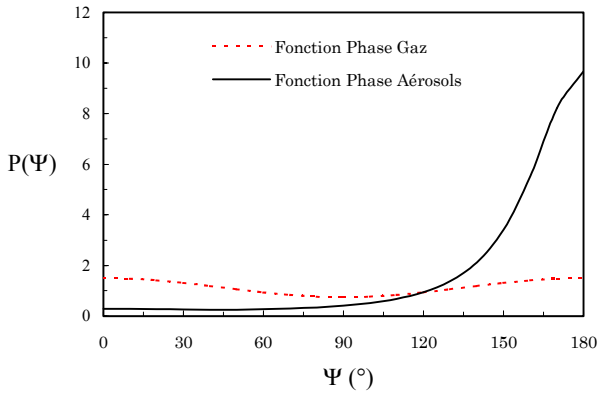



*Figure III.5 : Fonctions de phase des gaz et des aérosols ($g_{1p}$=0.6, $g_{2p}$=0.4, $a$=0.96).*

Les paramètres atmosphériques indiqués ci-dessus peuvent être :

- *Directement entrés par l'opérateur* : L'éclairement solaire $E_\lambda$ ($W.m^{-2}.\mu m^{-1}$), le facteur d'échelle des gaz $H_m$ (m), l'épaisseur optique de diffusion des gaz $\tau_{m;}^{d}$ , la transmittance des gaz d'absorption $T_{m;}^{a}$ , le facteur d'échelle des aérosols $H_p$ (m), l'épaisseur optique des aérosols $\tau_p$, l'albédo des aérosols $\omega_p$, les coefficients $g_{1p}$ , $g_{2p}$ et $a_p$ des 2 fonctions de Henyey-Greenstein (Lenoble, 1993) et l'altitude du capteur ($H_{Capt}$).
- *Des configurations atmosphériques pré-définies* : Ces configurations sont issues du modèle MODTRAN (Berk *et al.*, 1989) et sont stockées dans une base de données. De

plus, l'opérateur peut sélectionner une configuration dite éditable qui contient des caractéristiques atmosphériques spécifiés par l'opérateur pouvant être issues de mesures ou de simulations. Les valeurs spectrales sont stockées pour des longueurs d'onde de 0.3µm jusqu'à 15µm avec un pas de 1 ou de 10 cm-1. Ce domaine a été choisi en vue de l'extension de DART au domaine de l'infrarouge thermique (IRT).

Base de données de paramètres atmosphériques

La base de données atmosphérique contient des paramètres atmosphériques :

- La constante solaire spectrale $E_{\lambda 0}$ ($W.m^{-2}.\mu m^{-1}$) au sommet de l'atmosphère et pour la distance Terre-Soleil moyenne ($149.10^6$km). La constante solaire pour un certain jour est déterminée avec l'expression suivante :

$$E_\lambda = E_{\lambda 0}.[1 + e.\cos(\frac{2\pi(J-3)}{365})]^{-2} \quad (3.17)$$

  Où (e) est l'excentricité de l'orbite terrestre ($e \approx 0.0167$) et J est le jour julien de l'année (avec $J \in [1,365]$).

- Les facteurs d'échelle des gaz ($H_m$) : Ils sont donnés pour les principaux gaz absorbants ($H_2O$, $CO_2$, CO, $CH_4$, $N_2O$, $O_2$, $N_2$) et pour les gaz qui expliquent l'essentiel de la diffusion atmosphérique, pour 7 profils atmosphériques (6 profils issus de MODTRAN et un profil défini par l'opérateur, voir Annexe C.4). Les 6 profils types correspondent à différentes latitudes et saisons : "*US Standard 1976*", "*Tropical*" (15° nord), "*Mid-Latitude Summer*" (45° nord en juillet), "*Mid-Latitude Winter*" (45° nord en janvier), "*Sub-Arctic Summer*" (60° nord en juillet), "*Sub-Arctic Winter*" (60° nord en janvier). Les facteurs d'échelle ($H_m$) ont été calculés par régression sur les profils de densité volumique des gaz (*Tableau III.1*). Ils sont utilisés pour déterminer les profils verticaux des coefficients d'extinction atmosphérique utilisés par DART.

| | ***Gaz*** | ***US Std.*** | ***Tropical*** | ***Mid. Lat. S.*** | ***Mid. Lat. W.*** | ***Sub.Art S.*** | ***Sub Art. W.*** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **absorption** | **$H_20$** | 2.402 | 2.167 | 2.088 | 2.434 | 2.289 | 3.472 |
| | **$CO_2$** | 8.468 | 8.847 | 8.654 | 7.997 | 8.415 | 7.543 |
| | **CO** | 6.244 | 6.393 | 6.308 | 5.957 | 6.196 | 5.714 |
| | **$CH_4$** | 8.193 | 8.535 | 8.025 | 7.485 | 7.795 | 7.061 |
| | **$N_2O$** | 8.109 | 8.464 | 7.990 | 7.460 | 7.449 | 7.053 |
| | **$O_2$** | 8.449 | 8.847 | 8.644 | 7.972 | 8.424 | 7.532 |
| | **$N_2$** | 4.640 | 4.845 | 4.694 | 4.259 | 4.567 | 3.914 |
| **diffusion** | **Tous** | 8.455 | 8.835 | 8.814 | 7.972 | 8.424 | 7.553 |

*Tableau III.1 : Facteurs d'échelle ($H_m$) des gaz (en km).*

L'ozone est traitée différemment des autres gaz absorbants, car le profil de sa concentration diffère beaucoup d'une exponentielle (*Figure III.6*). Le coefficient d'extinction des gaz est proportionnel à la concentration volumique de matière. Ainsi, pour les cellules *Air*, nous l'attribuons proportionnellement à la distribution verticale de la fraction de matière mesurée en cm atm/km. Le profil de densité volumique relative est directement stocké, de 0 à 50km avec un pas de 1km, pour les 7 configurations atmosphériques considérées.

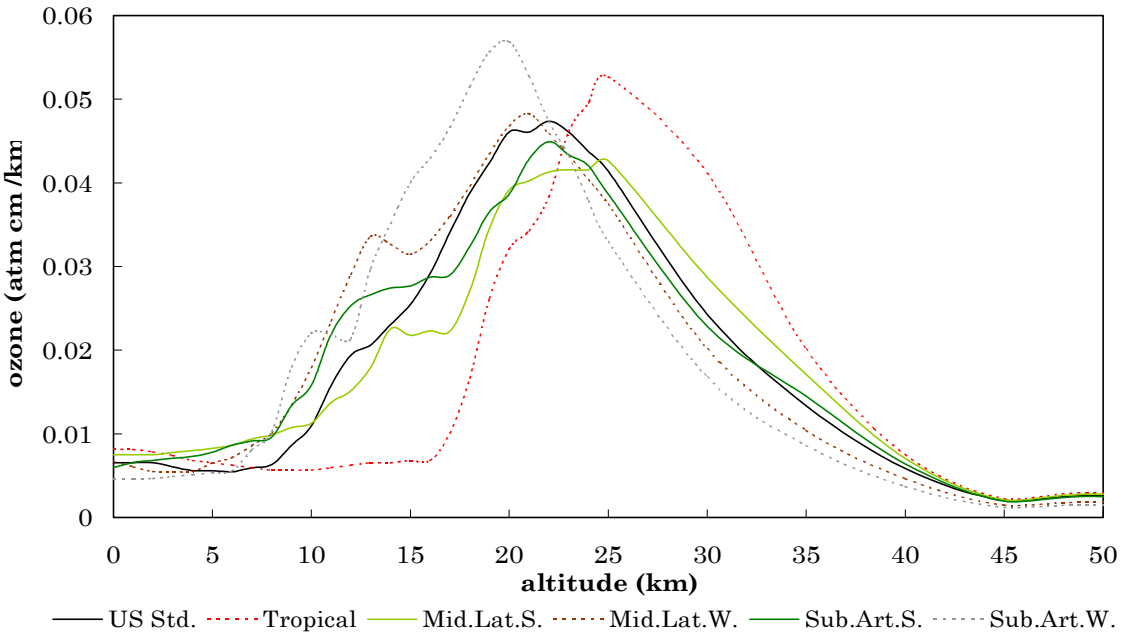



*Figure III.6 : Distribution verticale de l'ozone dans l'atmosphère pour les différentes configurations atmosphériques.*

- Les paramètres spectraux α et β des gaz non absorbants : La variabilité spectrale de l'épaisseur optique gazeuse pour la diffusion est supposée suivre la loi $\tau(\lambda)=\alpha.\lambda^{-\beta}$ (Lenoble, 1993). Les valeurs par défaut contenus dans la base de données sont $\alpha=0.0086$ et $\beta=4.1303$.

- Les transmittances des gaz absorbants ($T_{m,}^{a}$) : Elles sont données pour les 7 types d'atmosphère. En raison de sa forte variabilité dans l'espace et le temps (*Figure III.7*), la transmittance de la vapeur d'eau ($T_{eau}$) peut aussi être calculée à partir de la quantité de vapeur d'eau précipitable ($d_{H20}$) et de la transmittance de la vapeur d'eau pré-calculée pour une vingtaine de valeurs de $d_{H20}$ entre 0.1 cm atm et 5 cm atm avec le type d'atmosphère "*US Standard 1976*". Cette possibilité de définir $d_{H20}$ correspond au mode dit "Configurable". Elle peut être utilisée avec chaque configuration atmosphérique pour les gaz autres que le $H_2O$.

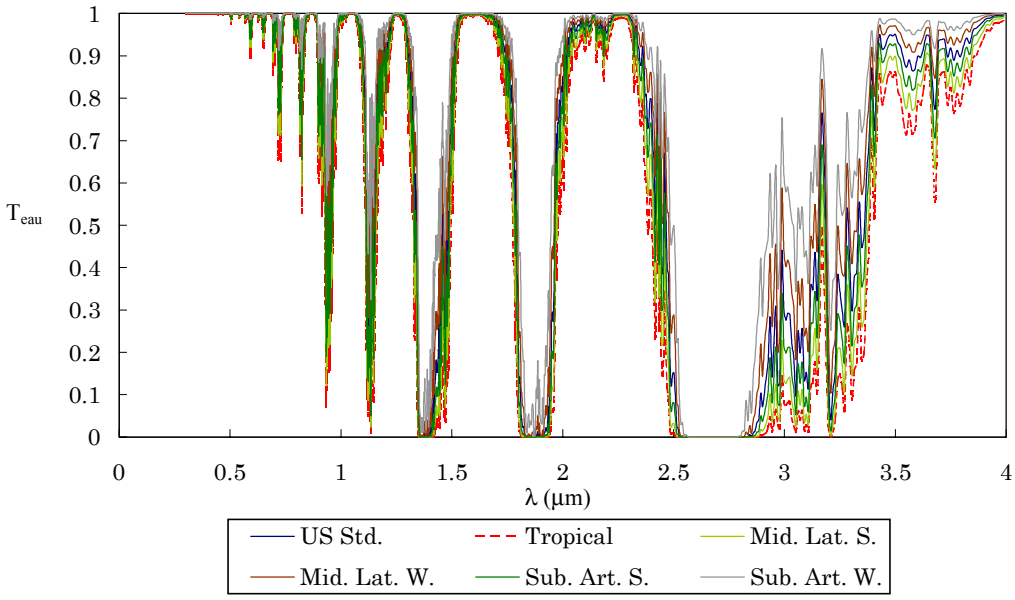



*Figure III.7 : Transmittances de l'eau ($T_{eau}$) en fonction de la longueur d'onde pour chaque configuration atmosphérique.*

- *Les facteurs d'échelle des aérosols ($H_p$)* : Ces valeurs sont données pour 6 configurations prédéfinies. Il s'agit de la configuration "éditable" par l'opérateur et de cinq configurations issues de MODTRAN : "*Rural V=23 km*" (poussières principalement), "*Maritime V=23 km*" (aérosols maritimes), "*Urban V=5 km*" (pollution urbaine), "*Tropospheric V=50 km*" (très faible quantité), "*Fog Radiation V=0.5 km*" (composants hydriques). Le terme V indique la visibilité horizontale.
- L'albédo ($\omega_p$) et épaisseur optique des aérosols ($\tau_p$) en fonction de la longueur d'onde (*Figures III.8* et *III.9*).

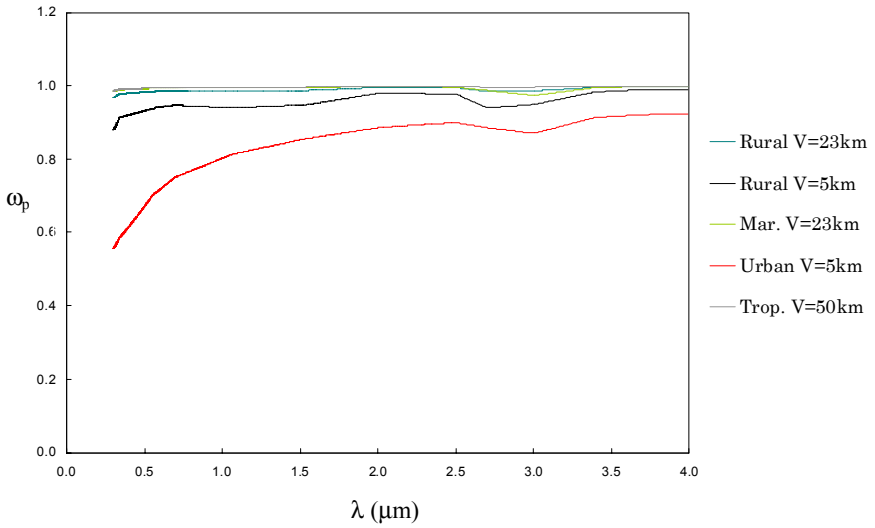



*Figure III.8 : Albédo de diffusion des aérosols en fonction de la longueur d'onde.*

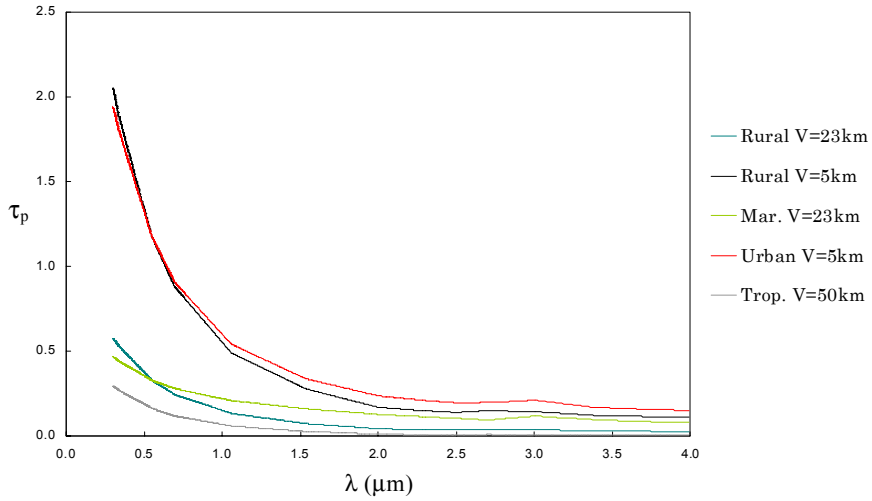



*Figure III.9 : Epaisseurs optiques des aérosols en fonction de la longueur d'onde.*

- Les paramètres $g_{1p}$ , $g_{2p}$ et $a_p$ de la fonction de phase des aérosols pour les 6 configurations prédéfinies des aérosols.

Le *Tableau III.2* recense l'ensemble des paramètres d'entrée pour l'atmosphère :

| Option | Constituant | Paramètres | Description |
|---|---|---|---|
| **Définition des τ et $H_m$ par l'utilisateur** | | $E_\lambda$ | Éclairement solaire |
| | **GAZ** | $H_m$ | Facteur d'échelle moyen des différents gaz |
| | | $\tau_m^d$ | Épaisseur optique de diffusion |
| | | $T_m^a$ | Transmittance des gaz d'absorption |
| | **AÉROSOLS** | $\tau_p$ , $H_p$ | Épaisseur optique des aérosols et facteur d'échelle des aérosols |
| | | $\omega_p$, $g_{1p}$ , $g_{2p}$ , $a_p$ | Albédo et paramètres qui décrivent la fonction de phase des aérosols |
| **Configurations prédéfinies** | | $\lambda_{min}$ , $\lambda_{max}$ | Longueurs d'onde minimale et maximale en µm |
| | | J | Jour julien |
| | **GAZ** | n° type ($d_{H2O}$ si n° type=7) | Éditable (0), US Standard (1), Tropical (2), Latitude moyenne été (3) ou hiver (4), Sub-artique été (5) ou hiver (6), et configurable (7) |
| | **AÉROSOLS** | n° type | Modèle éditable (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 III.2 : Paramètres atmosphériques utilisés par DART*

### III.2.3 Algorithme de simulation

La simulation du transfert radiatif dans le système "paysage-atmosphère" comprend cinq étapes (*Figure III.10*) :

1. Propagation du rayonnement solaire dans la haute et moyenne atmosphère.
2. Propagation du rayonnement dans le paysage terrestre.
3. Rétrodiffusion atmosphérique vers la surface terrestre.
4. Propagation du rayonnement de couplage dans le paysage terrestre.
5. Propagation du rayonnement vers le capteur et le haut de l'atmosphère.

Au niveau de la configuration d'observation, l'altitude du capteur radiométrique ($H_{capt}$) est définie par l'opérateur. L'altitude effectivement utilisée est une valeur approchée de $H_{capt}$ : c'est l'altitude maximale de la cellule *Air* qui contient le capteur.

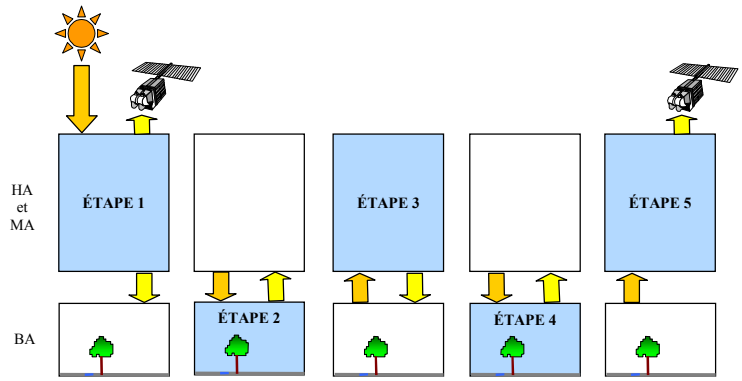



*Figure III.10 : Les 5 étapes de la simulation du système paysage-atmosphère.*

1) *Propagation du rayonnement solaire dans la haute et moyenne atmosphère :* Cette étape simule la propagation d'un rayon solaire dans la haute et moyenne atmosphère. En sortie, elle donne la distribution angulaire de l'éclairement descendant au-dessus de la basse atmosphère (*Figure III.11*) et au niveau du capteur.

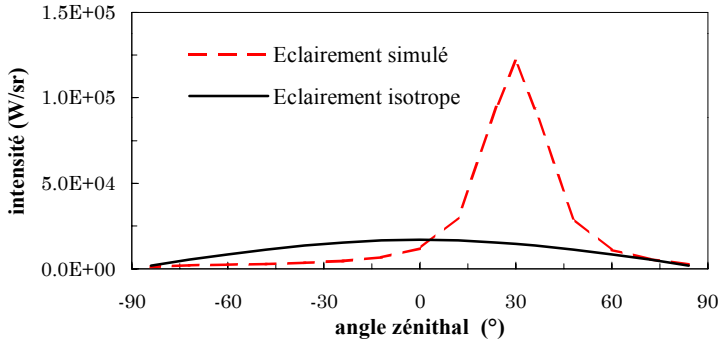



*Figure III.11 : Comparaison entre la distribution angulaire de l'éclairement atmosphérique simulée par DART et isotrope, dans le plan principal. Les paramètres de simulation sont $\theta_s$ = 30°, $\tau_p$ = 0.202, $H_p$=2000m, $\tau_m$ = 0.049, $H_m$=8000m, $\omega_p$=0.947, $g_{1p}$=0.790, $g_{2p}$=0.400, $a_p$=0.950.*

L'obtention de la distribution angulaire de l'éclairement atmosphérique diffus est une amélioration importante par rapport à considérer l'éclairement atmosphérique comme étant isotrope. D'autre part, le modèle calcule la réflectance atmosphérique due à la moyenne et haute atmosphère au niveau du capteur et au sommet de l'atmosphère. La simulation est conduite en prenant en compte les diffusions des cellules *Air* jusqu'à l'ordre 3.

2) *Propagation du rayonnement dans le paysage terrestre :* La simulation du transfert radiatif peut prendre en compte l'air contenu dans le paysage, i.e. la basse atmosphère.

3) *Rétrodiffusion atmosphérique vers la surface terrestre :* Calcul de la rétrodiffusion atmosphérique à partir du rayonnement montant issu de l'étape 2. Cette détermination est réalisée par convolution de l'énergie montante en bas de l'atmosphère avec une fonction de transfert pré-calculée. Cette dernière est calculée en simulant l'énergie $W_{BOA}(i',j',\Omega'\downarrow)$ rétrodiffusée par l'atmosphère sur chaque pixel (i',j') du haut de la basse atmosphère et pour toute direction descendante $\Omega'\downarrow$, connaissant l'énergie montante unitaire $W_{BOA}(i,j,\Omega\uparrow)$ selon une direction montante $\Omega\uparrow$ à partir d'un pixel (i,j) de la couche de cellules supérieure de BA. Par suite, la fonction de transfert est notée $FT_{BA\text{-}BA}(\Delta i,\Delta j,\Omega\uparrow,\Omega'\downarrow)$, où $\Delta i=i'-i$ et $\Delta j=j-j'$. L'expression de la convolution est :

$$W_{BOA}(i', j', \Omega'\downarrow) = \sum_i \sum_j \sum_{\Omega\uparrow} W_{BOA}(i, j, \Omega\uparrow) \cdot FT_{BA\text{-}BA}(\Delta i, \Delta j, \Omega\uparrow, \Omega'\downarrow) \qquad (3.17)$$

La fonction de transfert $FT_{BA\text{-}BA}$ est établie en considérant les diffusions multiples d'ordre 1 et 2. Son pré-calcul permet de diminuer les temps de calcul en évitant de simuler pour chaque énergie $W_{BOA}(i,j,\Omega\uparrow)$ le suivi de rayons dans l'atmosphère.

4) *Propagation du rayonnement de couplage dans le paysage terrestre :* Simulation du rayonnement réfléchi par le paysage terrestre à partir du rayonnement incident calculé à l'étape 3.

5) *Propagation du rayonnement vers le capteur et le haut de l'atmosphère :* Calcul, à partir du rayonnement issu de BA, le rayonnement transmis à la fois jusqu'au capteur radiométrique et en haut de l'atmosphère. Ce calcul est réalisé avec les 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 l'énergie montante $W_{BOA}(i',j',\Omega\uparrow)$ en tout pixel (i',j') à l'altitude du capteur, selon toute direction montante $\Omega'\uparrow$, sachant que la seule source

d'énergie, est le pixel (i=i'-Δi, j=j'-Δj) du haut de (BA) qui envoie une énergie $W_{BOA}(i,j,\Omega\uparrow)$ selon la direction montante $\Omega\uparrow$.

$$W_{Capteur}(i', j', \Omega'\uparrow) = \sum_i \sum_j \sum_{\Omega\uparrow} W_{BOA}(i, j, \Omega\uparrow) \cdot FT_{BA\text{-}Capteur}(\Delta i, \Delta j, \Omega\uparrow) \quad (3.18)$$

$$W_{TOA}(i', j', \Omega'\uparrow) = \sum_i \sum_j \sum_{\Omega\uparrow} W_{BOA}(i, j, \Omega\uparrow) \cdot FT_{BA\text{-}TOA}(\Delta i, \Delta j, \Omega\uparrow) \quad (3.19)$$

Les 3 fonctions de transfert sont pré-calculées simultanément en considérant les diffusions jusqu'au troisième ordre.

### III.2.4 Produits liées à la simulation de l'atmosphère

En mode standard, le modèle DART fournit la distribution verticale du rayonnement absorbé par l'atmosphère ($fAR_{ATM}$) et le FRD (images directionnelles et leurs moyennes) respectivement au sommet de l'atmosphère ($\rho_{tot,TOA}$) et au niveau du capteur ($\rho_{tot,capt}$) (*Figure III.12*).

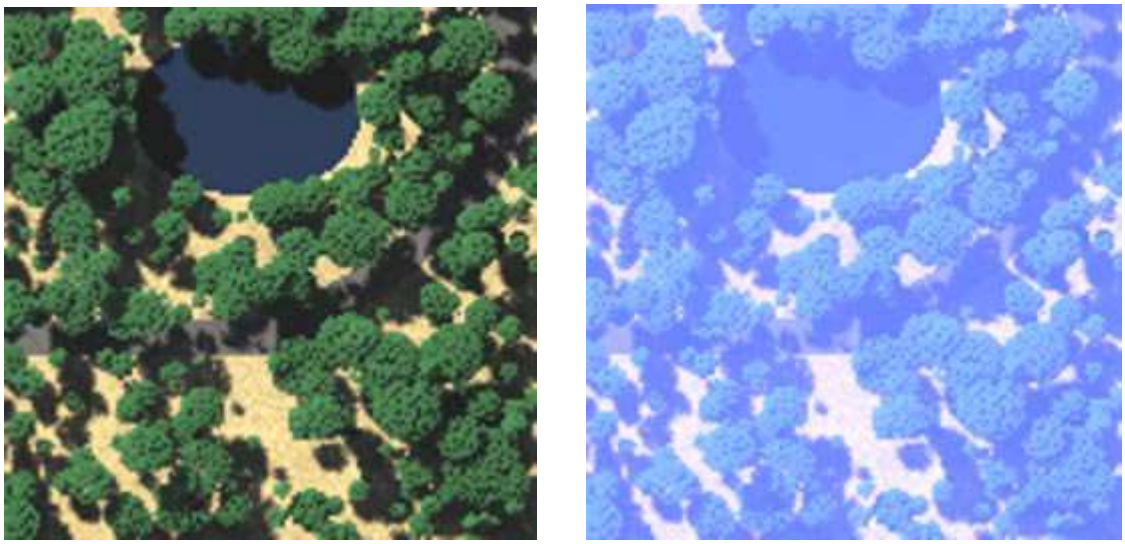
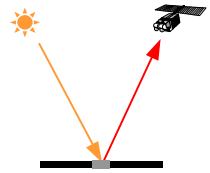
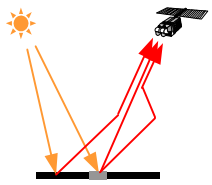


*Figure III.12 : Comparaison des compositions colorées d'images DART de savane arborée (parce lle de 100x100m avec des cellules de 1x1x1m) avec à gauche l'image FRD en bas de l'atmosphère ($\rho_{tot,BOA}$) et à droite celle en haut de l'atmosphère ($\rho_{tot,TOA}$).*

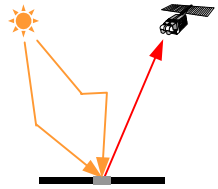
En mode non standard, DART peut fournir les produits (images et moyennes) suivants :



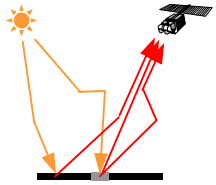
- $\rho_{direct\text{-}direct,\ capt}$ et $\rho_{direct\text{-}direct,\ TOA}$ : Réflectance "direct-direct" due au rayonnement qui est réfléchi par le sol et remonte vers le capteur ou le haut de l'atmosphère sans être diffusé.



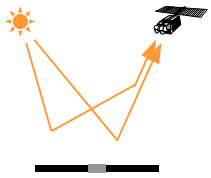
- $\rho_{direct\text{-}tot,\ capt}$ et $\rho_{direct\text{-}tot,\ TOA}$ : Réflectance "direct-total" due au rayonnement qui atteint le sol sans être diffusé et qui se propage vers le capteur ou le haut de l'atmosphère de manière directe ou diffuse.



- $\rho_{diffus\text{-}direct,\ capt}$ et $\rho_{diffus\text{-}direct,\ TOA}$ : Réflectance "diffus-direct" due au rayonnement qui atteint le sol après avoir été diffusé et qui remonte vers le capteur ou le haut de l'atmosphère de manière directe (sans être intercepté).



- $\rho_{diffus\text{-}tot,\ capt}$ et $\rho_{diffus\text{-}tot,\ TOA}$ : Réflectance "diffus-total" due au rayonnement qui atteint le sol après avoir été diffusé et qui se propage vers 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.

Le modèle DART stocke systématiquement dans un fichier (*report.out*) certaines propriétés optiques de l'atmosphère (*Tableau III.3)*. La transmittance gazeuse totale est un paramètre d'entrée, spécifié par l'utilisateur, ou calculé pour une bande spectrale spécifiée en fonction des valeurs stockées dans une base de données. Cette valeur correspond à l'absorption gazeuse d'un chemin vertical à travers l'atmosphère.

| 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/m²) |
| $E_{direct,BOA}$ | Éclairement direct BOA (W/m²) |
| $E_{diffus,BOA}$ | Éclairement diffus atmosphérique BOA (W/m²) |
| $E_{couplage,BOA}$ | Éclairement de couplage BOA (W/m²) |
| $E_{direct,capt}$ | Éclairement direct au niveau du capteur (W/m²) |
| $E_{diffus,capt}$ | Éclairement diffus atmosphérique au niveau du capteur (W/m²) |
| $\rho_{hh,BOA}$ | Albédo BOA |
| $\rho_{hh,\ CAPT}$ | Albédo au niveau du capteur |
| $\rho_{hh,\ TOA}$ | Albédo TOA |
| $s_{ATM}$ | Albédo atmosphérique |

*Tableau III.3 : Paramètres en sortie du modèle DART*

### III.2.5 Couplage paysage-atmosphère

Par rapport à l'utilisation associée d'un modèle atmosphérique et d'un modèle de réflectance de couvert (Gascon *et al.*, 2001), la modélisation intégrée du paysage et de

l'atmosphère permet de prendre en compte l'hétérogénéité spatiale de l'éclairement atmosphérique de couplage.

Cet effet de couplage, aussi appelé effet d'environnement (Tanré *et al.*, 1982), est illustré ici à l'aide d'un paysage schématique constitué de bandes parallèles de 20 kilomètres de largeur et dont les réflectances sont alternativement de 50% et 0%. Pour cette expérience, nous considérons une longueur d'onde de 550 nm, un soleil au zénith ($\theta_s$=0°), une visée au nadir ($\theta_v$=0°), une atmosphère gazeuse de type *"Mid-Latitude Winter"* et des aérosols avec une épaisseur optique $\tau_p$ = 0.519 et une fonction de phase caractérisée par $g_{1p}$=0.810, $g_{2p}$=0.400 et $a_p$=0.945.

La réflectance atmosphérique est $\rho_{atm}$≈12.6%. Le couplage paysage-atmosphère explique que l'image DART à la frontière entre les deux bandes n'est pas un échelon parfait (*Figure III.13*). La variation de la réflectance apparente en haut de l'atmosphère, à l'intérieur d'une bande après avoir enlevé la composante atmosphérique ($\rho_{atm}$), atteint ε = 2% en relatif entre son centre (A) et ses bords (B).

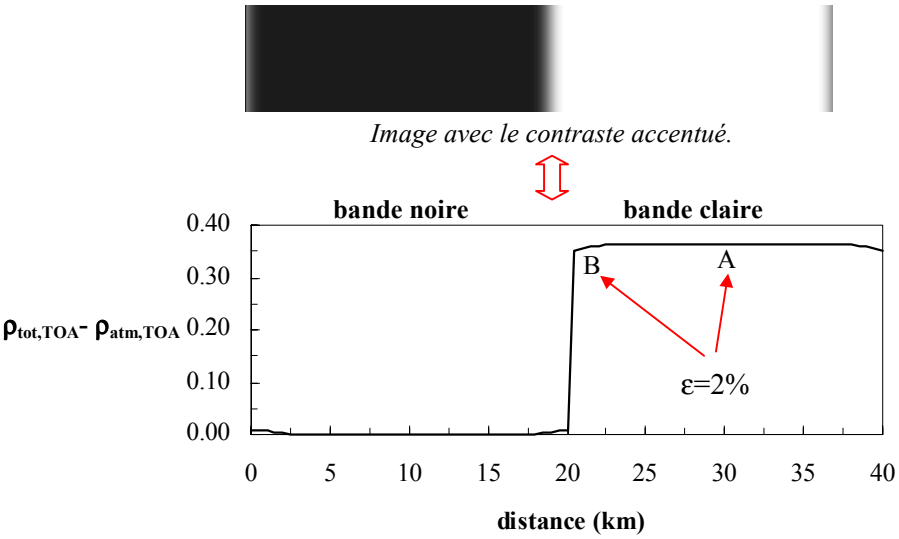



*Figure III.13 : Image simulée par DART des deux bandes (une bande noire (ρ=0%) et une bande claire (ρ=50%)) et profil de la réflectance TOA corrigée de la réflectance atmosphérique ($\rho_{atm,TOA}$ = 0.12). Les paramètres atmosphériques sont : $\theta_s$ = 0°, $\tau_p$ = 0.519, $H_p$=2000m , $\tau_m$ = 0.097, $H_m$=8000m , $\omega_p$=0.947 , $g_{1p}$=0.810 , $g_{2p}$=0.400 , $a_p$=0.945 .*

Ce paysage schématique est utilisé pour définir les dimensions horizontales optimales (du point de vue de la précision et du temps de calcul) des cellules de la moyenne atmosphère ($\Delta X_{MA}$, $\Delta Y_{MA}$). La taille retenue ($\Delta X_{MA}$= $\Delta Y_{MA}$= 100m) assure une erreur relative inférieure à 3% par rapport à toutes les luminances simulées avec des petites cellules ($\Delta X_{MA}$=$\Delta Y_{MA}$= 10m et $\Delta Z_{MA}$ = 40m).

### III.2.6 Tests de validation

Les tests de validation sont réalisés en comparant les composantes d'éclairement en bas de l'atmosphère ainsi que les luminances au niveau du capteur, obtenues pour DART et quatre autres modèles (6S (Vermote et al., 1997), AMARTIS (Miesch, 1999), AMARTIS Monte-Carlo (Miesch, 1999) et 6S+DART (Gascon et al., 2001)) brièvement décrits dans l'*Annexe B*. Le modèle 6S+DART constitue une première approche développée pour simuler les réflectances TOA sans tenir compte précisément du couplage radiatif entre le paysage et l'atmosphère. Cette comparaison est la suite d'une étude (Lefèvre-Fonollosa, 1999) qui avait montré des divergences entre les modèles 6S+DART, AMARTIS et 6S. Ce travail initial est celui qui avait conduit à l'intégration complète de l'atmosphère dans le modèle DART.

La comparaison entre les modèles est réalisée pour des paysages simples capables d'être traités par tous les modèles analysés : sol plat de réflectance lambertienne, scène urbaine et paysage rural.

Nous comparons les modèles sur les composantes d'éclairement en bas de l'atmosphère ($E_{dir}$, $E_{diffus}$, $E_{couplage}$ et $E_{total}$) exprimées en $W.m^{-2}.\mu m^{-1}$ (*Figure III.14*) et les luminances au niveau du capteur ($L_{tot\text{-}direct}$, $L_{tot\text{-}diffus}$, $L_{atm}$, $L_{direct\text{-}direct}$ , $L_{diffus\text{-}direct}$ , $L_{direct\text{-}diffus}$ , $L_{diffus\text{-}diffus}$ , $L_{couplage\text{-}tot}$ et $L_{totale}$) en $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$ (*Figure III.15*).

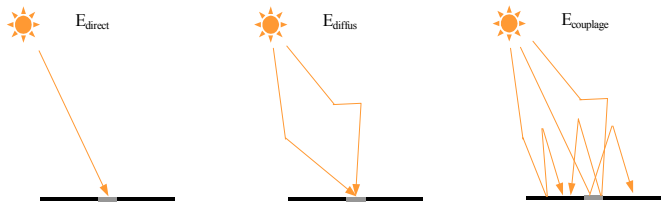



*Figure III.14 : Schéma des composantes de l'éclairement en bas de l'atmosphère.*

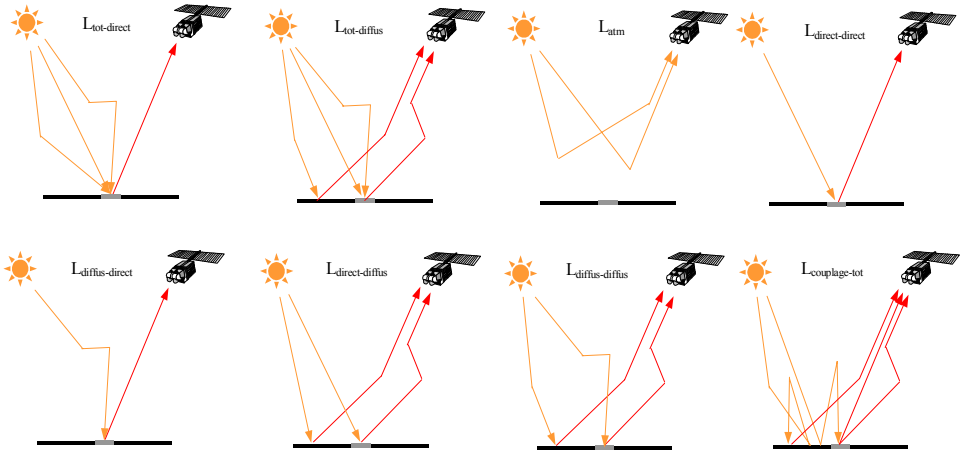



*Figure III.15 : Schéma des composantes de la luminance acquise par le capteur.*

Sol plat de réflectance lambertienne

Les modèles DART, 6S et AMARTIS MC sont comparés dans le cas d'un sol plat lambertien ($\rho_{sol}$), avec $\lambda$ = 550 nm. La fonction de phase des aérosols utilisée est approchée par DART avec les paramètres : $g_{1p}$=0.81, $g_{2p}$=0.4, $a_p$=0.945 et $\omega_p$=0.947. Les configurations retenues et les résultats obtenus avec le modèle AMARTIS MC proviennent de Miesch (1999). L'expérience n'inclut pas les résultats de 6S+DART, car ils sont identiques à ceux du modèle 6S. Elle ne présente pas non plus les résultats d'AMARTIS, car pour le paysage considéré les résultats sont égaux à ceux issus de 6S à l'exception des termes de couplage qui sont ceux d'AMARTIS MC. Les trois configurations considérées sont :

(1) "$\theta_s$=0° , $\theta_v$=0° et $\rho_{sol}$=0.1". Les gaz présents dans l'atmosphère sont définis par la configuration *"latitude moyenne en hiver",* de 6S, qui correspond à une atmosphère relativement sèche. L'abondance des aérosols est définie par une épaisseur optique $\tau_p$ = 0.2347 à 550nm.

(2) "$\theta_s$=30°, $\theta_v$=30°, $\Delta\varphi$=180° et $\rho_{sol}$=0.2". L' atmosphère est identique à celle de (1).

(3) "$\theta_s$=60°, $\theta_v$=40°, $\Delta\varphi$=180° et $\rho_{sol}$=0.5". L'atmosphère est définie par le modèle "tropical" de 6S avec une visibilité de 10km. Cette configuration est a priori la plus défavorable pour simuler le transfert radiatif atmosphérique.

Les *Tableaux III.4, III.5* et *III.6*, présentent pour les 3 configurations précédentes, les éclairements en bas de l'atmosphère ($E_{dir}$, $E_{diffus}$, $E_{couplage}$ et $E_{total}$) et les luminances au niveau du capteur ($L_{tot\text{-}direct}$, $L_{tot\text{-}diffus}$, $L_{atm}$ et $L_{totale}$) ainsi que les erreurs relatives "DART vs 6S" ($\xi_{DART/6S}$) et "DART vs AMARTIS MC" ($\xi_{DART/AMARTIS\ MC}$).

| | 6S | AMARTIS MC | DART | $\xi_{DART/6S}$ (%) | $\xi_{DART/AMARTIS\ M.C.}$ (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| **E direct** | 1342.2 | 1342.3 | 1342.3 | $\lvert\xi\rvert$<0.5 | $\lvert\xi\rvert$<0.5 |
| **E diffus** | 382.9 | 376.2 | 379.3 | -0.94 | +0.8 |
| **E couplage** | 22.4 | 23.3 | 23.0 | +2.6 | -1.3 |
| **E totale** | 1747.5 | 1741.8 | 1744.6 | $\lvert\xi\rvert$<0.5 | $\lvert\xi\rvert$<0.5 |
| **L tot-irect** | 38.5 | 38.5 | 38.4 | $\lvert\xi\rvert$<0.5 | $\lvert\xi\rvert$<0.5 |
| **L tot-diffus** | 11.0 | 10.8 | 10.7 | -2.8 | -0.9 |
| **L atm** | 28.5 | 28.2 | 28.8 | +1.05 | +2.1 |
| **L totale** | 78.0 | 77.5 | 77.9 | $\lvert\xi\rvert$<0.5 | +0.51 |

*Tableau III.4 : Configuration «$\theta_s$=0° , $\theta_v$=0°, $\Delta\varphi$=180° » à $\lambda$=550 nm.*

| | 6S | AMARTIS MC | DART | $\xi$ DART/6S (%) | $\xi$ DART/AMARTIS M.C. (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| **E direct** | 1098.4 | 1098.5 | 1098.5 | $\|\xi\|$<0.5 | <0.5 |
| **E diffus** | 363.8 | 355.6 | 363.1 | $\|\xi\|$<0.5 | +2.0 |
| **E couplage** | 38.4 | 39.9 | 39.3 | +2.2 | -1.5 |
| **E totale** | 1500.6 | 1494.0 | 1500.9 | $\|\xi\|$<0.5 | <0.5 |
| **L tot-direct** | 62.6 | 62.4 | 63.2 | +0.9 | +1.2 |
| **L tot-diffus** | 20.7 | 20.2 | 20.5 | -1.0 | +1.5 |
| **L atm** | 22.8 | 21.2 | 23.4 | +3.1 | +9.8 |
| **L totale** | 106.1 | 103.8 | 107.1 | $\|\xi\|$<0.5 | +2.4 |

*Tableau III.5 : Configuration "$\theta_s$=30° , $\theta_v$=30° , $\Delta\varphi$=180°" à $\lambda$=550 nm.*

| | 6S | AMARTIS MC | DART | $\xi$ DART/6S (%) | $\xi$ DART/AMARTIS M.C. (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| **E direct** | 321.6 | 321.9 | 321.9 | $\|\xi\|$<0.5 | $\|\xi\|$<0.5 |
| **E diffus** | 383.5 | 369.1 | 399.9 | +4.1 | +7.7 |
| **E couplage** | 60.2 | 63.2 | 63.1 | +4.6 | -1.6 |
| **E totale** | 765.3 | 754.2 | 784.9 | +2.5 | +3.9 |
| **L tot-direct** | 59.4 | 58.5 | 57.1 | -4.0 | -2.4 |
| **L tot-diffus** | 41.1 | 39.8 | 39.0 | -5.1 | -2.0 |
| **L atm** | 45.3 | 40.1 | 46.3 | +2.2 | +15.4 |
| **L totale** | 146.3 | 138.3 | 142.4 | -2.7 | +2.9 |

*Tableau III.6 : Configuration "$\theta_s$=60°, $\theta_v$=40°, $\Delta\varphi$=180°" à $\lambda$=550 nm.*

Pour les trois configurations, tous les modèles donnent des estimations quasi identiques de $E_{direct}$ . Les termes où intervient le rayonnement diffus ($L_{tot\text{-}diffus}$ et $L_{atm}$) sont en général ceux pour lesquels les différences sont les plus importantes, différences dues à la forte sensibilité de ces composantes à l'expression utilisée pour représenter la fonction de phase des aérosols. En effet, pour les modèles AMARTIS MC et DART les fonctions de phase ne sont que des approximations de la fonction de phase utilisée dans 6S. L'erreur relative maximale (+15.4%) correspond à la composante $L_{atm}$ de la configuration "$\theta_s$=60°, $\theta_v$=40°, $\Delta\varphi$=180°".

| | 6S | DART | $\xi$ DART/6S (%) |
|---|---|---|---|
| **E direct** | 1033.3 | 1033.3 | $\|\xi\|$<0.5 |
| **E diffus** | 502.3 | 517.8 | +3.1 |
| **E couplage** | 63.4 | 63.1 | -0.5 |
| **E totale** | 1599.9 | 1614.2 | +0.9 |
| **L tot-direct** | 57.1 | 61.1 | +7.0 |
| **L tot-diffus** | 27.7 | 26.1 | -5.8 |
| **L atm** | 53.3 | 51.1 | -4.1 |
| **L totale** | 138.1 | 138.3 | $\|\xi\|$<0.5 |

| | 6S | DART | $\xi$ DART/6S (%) |
|---|---|---|---|
| **E direct** | 1029.0 | 1029.1 | $\|\xi\|$<0.5 |
| **E diffus** | 259.5 | 265.0 | +2.1 |
| **E couplage** | 24.5 | 23.1 | -5.7 |
| **E totale** | 1313.0 | 1317.1 | $\|\xi\|$<0.5 |
| **L tot-direct** | 60.4 | 60.7 | $\|\xi\|$<0.5 |
| **L tot-diffus** | 15.2 | 15.6 | +2.6 |
| **L atm** | 12.0 | 11.7 | -2.5 |
| **L totale** | 87.7 | 88.0 | $\|\xi\|$<0.5 |

*Tableau III.7 : Configurations "$\theta_s$=30°, $\theta_v$=30°, $\Delta\varphi$=180" à $\lambda$=450nm (gauche) et $\lambda$=650nm (droite).*

Les écarts entre les modèles tendent à croître avec l'allongement des trajets optiques (oblicité des directions d'éclairement et de visée) et avec l'épaisseur optique atmosphérique. Ceci est illustré ici pour les modèles DART et 6S avec les longueurs d'onde λ=450 nm et λ=650 nm, pour $\theta_s$=30° , $\theta_v$=30° , Δφ=180° (*Tableau III.7*). Les erreurs relatives les plus importantes sont données pour les composantes $L_{tot,direct}$ (λ=450nm) et $E_{couplage}$ (λ=650nm).

Les écarts observés à 450 nm sont les plus importants. De plus, l'importance de la diffusion gazeuse couplée à la diffusion du sol est mise en évidence en considérant une atmosphère sans aérosols, à 450 nm (*Tableau III.8*). La très faible diminution des écarts relatifs indique que les différences entre les deux modèles sont dues à la modélisation du transfert radiatif .

| | 6S | DART | $\xi_{DART/6S}$ (%) |
|---|---|---|---|
| **E direct** | 1422.0 | 1422.1 | \|ξ\|<0.5 |
| **E diffus** | 193.4 | 207.0 | +7.0 |
| **E couplage** | 142.4 | 137.1 | -3.7 |
| **E totale** | 1757.8 | 1766.2 | \|ξ\|<0.5 |
| **L tot-direct** | 178.3 | 178.0 | \|ξ\|<0.5 |
| **L tot-diffus** | 24.2 | 22.2 | -8.3 |
| **L atm** | 34.9 | 32.0 | -1.4 |
| **L totale** | 237.6 | 232.2 | -0.9 |

*Tableau III.8 : Comparaison DART-6S pour une atmosphère du type "latitude moyenne en été" sans aérosols. λ=450nm, $\theta_s$=30°, $\theta_v$=30°, $\Delta\varphi_v$=180°.*

La *Figure III.16* présente l'évolution de la réflectance atmosphérique ($\rho_{atm}$) des modèles DART et 6S, avec λ=450nm, dans le plan solaire et pour trois directions solaires ($\theta_s$=0°, 30°, 60°). Les erreurs relatives entre les deux modèles sont inférieures à 6% pour toutes les configurations simulées.

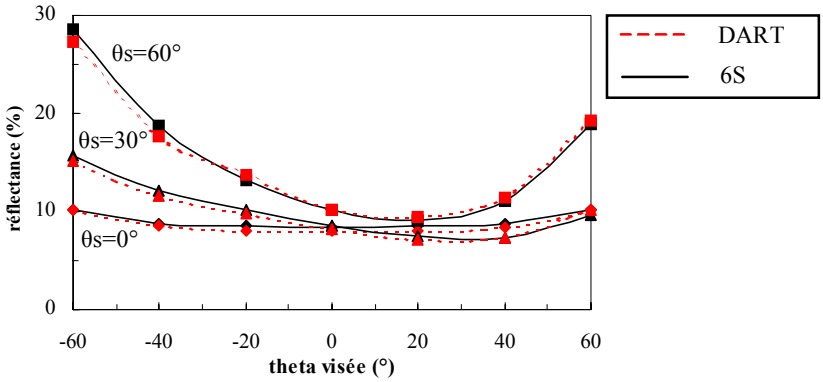



*Figure III.16 : Comparaison DART-6S de la réflectance atmosphérique, pour 3 directions solaires.*

Paysage urbain

Le deuxième site de validation est un paysage urbain constitué d'une route asphaltée entourée de deux bâtiments et de deux bandes de pelouse (*Figure III.17*). Seuls les deux modèles capables de simuler des paysages 3-D (AMARTIS , 6S+DART et DART) sont comparés.

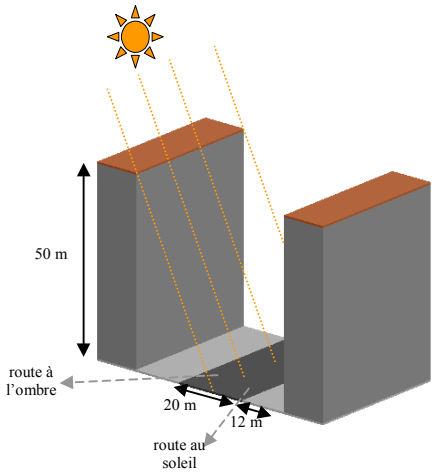



*Figure III.17 : Représentation 3D du site urbain.*

Le modèle AMARTIS représente les paysages à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT). Les murs ne peuvent donc être verticaux et sont caractérisés ici par une pente de 87°. Toutes les surfaces opaques sont supposées lambertiennes avec une réflectance de 0.27 pour le béton (bâtiments), 0.2 pour l'asphalte et 0.1 pour la pelouse. L'atmosphère est simulée avec le modèle de distribution des gaz "latitude moyenne en été" de 6S. Le modèle de distribution de la taille des aérosols est celui de Jünge (Lenoble, 1993) avec une abondance déterminée par une visibilité de 23km. La direction solaire est dans le plan perpendiculaire à l'axe de la route et avec un angle zénithal de 24°. Par suite, l'ombre du bâtiment couvre la moitié de la route.

La configuration de visée est $\theta_v$=0° et la longueur d'onde $\lambda$=580nm. La comparaison a porté sur les composantes des luminances de la route à l'ombre et au soleil (*Tableau III.9*).

L'erreur relative ($\xi$) sur $L_{total}$ est inférieure à 0.5%. Les plus forts écarts surviennent pour les plus faibles composantes : $\xi \approx 12\%$ pour $L_{diffus\text{-}diffus}$ et $L_{couplage}$. La composante $L_{direct\text{-}direct}$ est celle qui donne les plus faibles écarts ($\xi$<0.6%). Il est intéressant de noter que le modèle 6S+DART est précis par rapport à DART. Ceci est principalement dû au fait que les dimensions du paysage simulé sont assez faibles pour que l'épaisseur optique de l'air au sein du paysage puisse être négligée.

| | DART | | AMARTIS | | 6S+DART | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ( $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$) | Ombre | Soleil | Ombre | Soleil | Ombre | Soleil |
| $L_{direct-direct}$ | 0.00 | 53.90 | 0.0 | 54.2 | 0.00 | 53.99 |
| $L_{diffus-direct}$ | 6.21 | 6.42 | 6.6 | 6.8 | 6.42 | 6.34 |
| $L_{direct-diffus}$ | 11.91 | 12.53 | 12.0 | 12.1 | 12.03 | 12.76 |
| $L_{diffus-diffus}$ | 3.21 | 3.35 | 3.4 | 3.4 | 3.66 | 3.75 |
| $L_{couplage}$ | 1.66 | 1.68 | 1.3 | 1.4 | 1.01 | 1.01 |
| $L_{atm}$ | 22.11 | 22.11 | 21.9 | 21.9 | 21.86 | 21.86 |
| $L_{totale}$ | 45.10 | 99.99 | 45.2 | 99.7 | 45.02 | 99.74 |

*Tableau III.9 : Comparaison DART-AMARTIS-DART+6S. Scène urbaine 3-D. Atmosphère du type "latitude moyenne en été" sans aérosols. λ=450nm, $\theta_s$=30°, $\theta_v$=30°, $\Delta\varphi_v$=180°.*

Paysage rural

Les modèles DART, AMARTIS et 6S+DART sont aussi comparés pour un paysage rural constitué par une route bordée d'herbe au fond d'une vallée (*Figure III.18*). L'analyse porte sur les composantes de la luminance des pixels de la route au soleil et à l'ombre. La scène est invariante selon l'axe de la route. La route et l'herbe sont supposées horizontales et lambertiennes ($\rho_{route}$=0.2 et $\rho_{herbe}$=0.1). Les conditions atmosphériques sont les mêmes que pour le site urbain. La direction solaire est caractérisée par un zénith de 46° et se situe dans le plan perpendiculaire à l'axe de la route. L'une des pentes génère une ombre qui couvre la moitié de la route. La configuration d'observation est $\theta_v$=0° et λ=580nm.

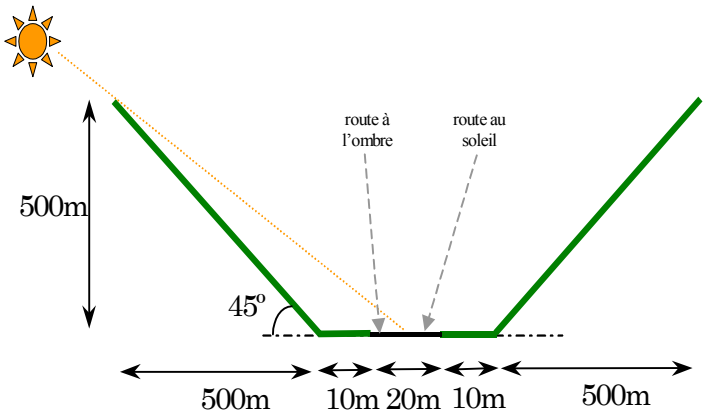



*Figure III.18 : Schéma de la scène naturelle 3-D.*

Les modèles DART et AMARTIS présentent des résultats similaires (*Tableau III.10*). Dans ce contexte, l'intérêt de DART est de simuler les diffusions de volume de la végétation et donc de pouvoir travailler avec un couvert végétal d'architecture hétérogène quelconque sur les pentes. Le modèle DART+6S diffère des autres modèles pour les termes relatifs à la propagation de rayonnement diffus ($L_{diffus-diffus}$, $L_{diffus-direct}$ et

$L_{direct\text{-}diffus}$). Les erreurs relatives par rapport aux autres modèles peuvent atteindre 75%, erreurs principalement dus à la non prise en compte de l'air contenu à l'intérieur de la vallée de l'approche DART+6S.

| | DART | | AMARTIS | | 6S+DART | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ( $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$) | Ombre | Soleil | Ombre | Soleil | Ombre | Soleil |
| $L_{direct\text{-}direct}$ | 0.00 | 22.71 | 0.00 | 23.2 | 0.00 | 19.49 |
| $L_{diffus\text{-}direct}$ | 10.12 | 10.13 | 10.01 | 10.10 | 10.31 | 10.26 |
| $L_{direct\text{-}diffus}$ | 4.66 | 4.84 | 4.57 | 4.93 | 3.77 | 3.85 |
| $L_{diffus\text{-}diffus}$ | 3.02 | 3.05 | 2.90 | 2.95 | 5.07 | 5.13 |
| $L_{couplage}$ | 0.50 | 0.50 | 0.45 | 0.45 | 0.65 | 0.65 |
| $L_{atm}$ | 22.58 | 22.58 | 22.53 | 22.53 | 22.44 | 22.44 |
| $L_{totale}$ | 40.88 | 63.81 | 40.47 | 64.16 | 42.26 | 61.83 |

*Tableau III.10 : Comparaison DART-AMARTIS-DART+6S pour la scène naturelle 3-D. Atmosphère du type "latitude moyenne en été" sans aérosols. $\lambda$=450nm, $\theta_s$=30°, $\theta_v$=30°, $\Delta\varphi_v$=180°.*

## III.3 Conclusion

L'approche adoptée pour simuler le transfert radiatif dans l'atmosphère, avec la méthode du suivi de rayons et des ordonnées discrètes, offre plusieurs avantages importants :

- Le modèle produit en sortie des images de sites avec une architecture complexe et pour un capteur radiométrique situé à une altitude quelconque dans l'atmosphère.
- L'air qui enveloppe le paysage terrestre est pris en compte. Cette amélioration est essentielle à la simulation des paysages avec des fortes dénivélées, *e.g.* zones montagneuses ou des paysages urbains avec de grands bâtiments.
- L'hétérogénéité spatiale de l'éclairement de couplage est prise en compte.

Le modèle DART a été évalué par rapport à d'autres modèles existants pour le cas de paysages très simples d'un point de vue architectural. Une validation plus profonde devrait intégrer le test de la représentativité du modèle dans le cas de scènes étendues et complexes. Ceci est particulièrement important pour la validation de la modélisation de la moyenne atmosphère, *i.e.* la couche qui affecte le plus l'hétérogénéité du rayonnement de couplage. Toutefois, cette validation est difficilement réalisable en utilisant des mesures terrain puisque les niveaux radiométriques du terme du couplage paysage-atmosphère sont faibles par rapport aux autres composantes.

Pour ce qui est de la prise en compte de l'air contenu dans le paysage, la comparaison des résultats issus de DART à l'approche 6S+DART a mis en évidence des divergences significatives pour une scène représentant une vallée.

Globalement, nous pouvons conclure que, par rapport aux approches non intégrées comme l'association de DART avec un modèle atmosphérique, l'intégration de l'atmosphère dans DART est une importante amélioration, tant en terme de précision radiométrique que de souplesse d'utilisation.

# IV EXTRACTION DE PARAMÈTRES BIOPHYSIQUES PAR INVERSION DU MODÈLE DART

L'obtention de paramètres biophysiques à partir de mesures de télédétection est très souvent réalisée à l'aide d'approches empiriques (Tucker, 1979; Sellers, 1985 ; Kimes *et al.*, 1987). Le problème majeur de ces approches est qu'elles requièrent des mesures terrain *in situ* spécifiques au site d'étude et à la date d'acquisition des données de télédétection.

L'inversion des modèles physiques de la réflectance des surfaces terrestres est une alternative de plus en plus utilisée, du fait de l'amélioration des modèles de réflectance et des techniques d'inversion (Kimes *et al.*, 2000). Par rapport aux approches empiriques, l'inversion de modèles ne nécessite pas ou peu de mesures terrain. De ce fait, elle est potentiellement plus robuste, et généralisable à tout biome.

Dans sa version initiale, le modèle DART a déjà été utilisé pour l'extraction de paramètres biophysiques par inversion avec des images acquises par les capteurs SPOT, Landsat et POLDER aéroporté (Estève, 1998). Les paramètres recherchés étaient deux paramètres structuraux de la végétation : le LAI et le taux de couverture arborée.

Mon travail a consisté à modifier et améliorer la méthode d'inversion pour permettre (1) l'inversion de la nouvelle version du modèle DART, et (2) l'extraction de nouveaux paramètres foliaires (concentration en chlorophylle et indice de structure) indispensables pour l'étude des échanges de matière et d'énergie comme la photosynthèse, l'évapotranspiration, la respiration, etc. (Peterson et Hubbard, 1992).

D'autre part, un travail préliminaire concernant l'estimation de paramètres à partir d'images à très haute résolution spatiale (THR) a été effectué. En effet, cette nouvelle génération de données de télédétection ouvre des perspectives très intéressantes pour la détermination plus fine de paramètres biophysiques à la fois au niveau de leur répartition spatiale et de leur précision. Cependant, les méthodes classiques ne sont pas directement applicables à des pixels de taille inférieure aux éléments du paysage (arbres, arbustes, etc.). Ainsi, l'utilisation de ces images nécessite de nouveaux développements. La méthode développée et présentée ici, combine l'utilisation de techniques de traitement d'image et l'inversion du modèle DART.

Finalement, ce chapitre présente une étude d'application où la méthode générale et celle adaptée à la très haute résolution spatiale sont testées pour l'estimation de paramètres biophysiques (indice foliaire, taux de couverture arborée, indice structural des feuilles) et biochimiques (concentration en chlorophylle des feuilles). Le site considéré est la Forêt de Fontainebleau en France.

## IV.1 Méthode d'inversion du modèle DART

Après une brève introduction sur l'inversion de modèles de transfert radiatif, nous présentons ici la méthode initialement développée par Estève (1998). Cette dernière est adaptée à l'extraction de paramètres à partir d'images multispectrales et multidirectionnelles. Ce point inclut une description des améliorations apportées pour permettre l'extraction des nouveaux paramètres foliaires (concentration en chlorophille $C_{ab}$ et indice structural N).

Un dernier point présente la méthode spécifiquement développée pour les images à très haute résolution spatiale.

### IV.1.1 Généralités sur l'inversion de modèles de tranfert radiatif

Les mesures de télédétection des surfaces naturelles peuvent être modélisées par un ensemble de quatre sous-systèmes définis par des paramètres en fonction de la bande spectrale (i) considérée (Kimes *et al.*, 2000) :

(a) *Le soleil*, caractérisé par un jeu de paramètres ($a_i$) : la direction solaire ($\theta_s$, $\varphi_s$) et l'intensité spectrale de l'éclairement.

(b) *L'atmosphère*, définie par un jeu de paramètres ($b_i$) définissant ses propriétés optiques.

(c) *Le paysage terrestre*, caractérisé par un ensemble ($c_i$) de paramètres pour la végétation et ($d_i$) pour les propriétés optiques et topographiques du sol.

(d) *Le capteur radiométrique*, caractérisé par un jeu de propriétés ($e_i$) comme la réponse spectrale, la direction de visée ($\theta_v$, $\varphi_v$), la réponse impulsionnelle du capteur, etc.

Employé en *mode direct*, un modèle de transfert radiatif se comporte comme un opérateur mathématique ($\Im$) qui calcule le FRD, appelé aussi réflectance de la surface terrestre $\rho_i$ ($R_i \in \Re^m$), en fonction de la configuration d'acquisition $G_i=(a_i, b_i, c_i, d_i, e_i)$ ($G_i \in \Re^n$).

$$\hat{\rho}_i = \Im(G_i) \tag{4.1}$$

Le *problème inverse* consiste à déterminer certaines valeurs de l'ensemble ($G_i$) (*e.g.*, $c_i$), connaissant les paramètres $G_i$ restants et les mesures du FRD ($\rho_i$).

Les paramètres que l'on cherche à extraire sont appelés *paramètres libres* $G_{Li}$ (avec $G_{Li} \in \Re^s$). Les autres paramètres sont appelés *paramètres fixes* $G_{Fi}$ (avec $G_{Fi} \in \Re^p$ où $n=s+p$). Ainsi on a $G_i = (G_{Li}, G_{Fi})$.

$$G_{Li} = \Im^{-1}(\rho_i, G_{Fi}) \tag{4.2}$$

En pratique, les valeurs assignées aux paramètres fixes doivent être les plus réalistes possible. Par exemple, les propriétés optiques des feuilles de nombreuses espèces peuvent être trouvées dans la littérature (Privette *et al.*, 1996b).

L'absence d'une fonction $\Im^{-1}$ déterministe complique l'obtention de la solution. Si $s$ est le nombre de paramètres libres, alors la procédure d'inversion requiert au moins $m = s$ équations indépendantes de la forme (4.2). Ces équations ne doivent pas être fortement corrélées. De plus, des équations additionnelles peuvent être obtenues à partir de la variation de paramètres bien connus comme la configuration géométrique d'acquisition ($\theta_s$, $\varphi_s$, $\theta_v$, $\varphi_v$) et la longueur d'onde ($\lambda$).

Si $m < s$, le système est sous-déterminé et nécessite donc plus d'équations indépendantes. Si $m = s$, il n'existe normalement pas de solution unique due aux inexactitudes du modèle et des mesures. Si $m > s$, le système est surdéterminé et ne possède donc pas de solution unique. Dans ce cas, on recherche, en pratique, la meilleure solution statistique. Ainsi, un vecteur $R_i$ avec $m \geq s$ permet de rechercher les paramètres $G_{Li}$ qui minimisent une fonction coût ($\varepsilon^2$) qui peut s'écrire :

$$\varepsilon^2 = \sum\left( \rho_i - \Im(G_{Fi}, G_{Li}) \right)^2 \tag{4.3}$$

### IV.1.2 Méthode initiale d'inversion

La méthode comprend trois étapes :

- Pré-calcul des FRD associés aux différentes configurations de la forêt présente dans la surface d'un pixel.
- Représentation des FRD simulées avec une fonction mathématique paramétrique.
- Minimisation de l'erreur entre les simulations et les mesures.

Pré-calcul des FRD

Le modèle DART permet de calculer le FRD (ρ) associé aux diverses configurations du paysage et pour toute direction de visée. Le FRD est simulé avec la représentation informatique la plus simplifiée possible de la réalité, afin de réduire les temps de calcul des simulations DART. Dans le cas étudié ici (i.e., couverts arborés) nous utilisons une maquette composée de 4 arbres identiques. Ces arbres sont distribués de sorte que le sol ne soit pas visible dans le cas d'une visée très oblique avec de faibles taux de recouvrement. La variation des distances entre les arbres de la scène détermine le taux de recouvrement (*Figure IV.1*).

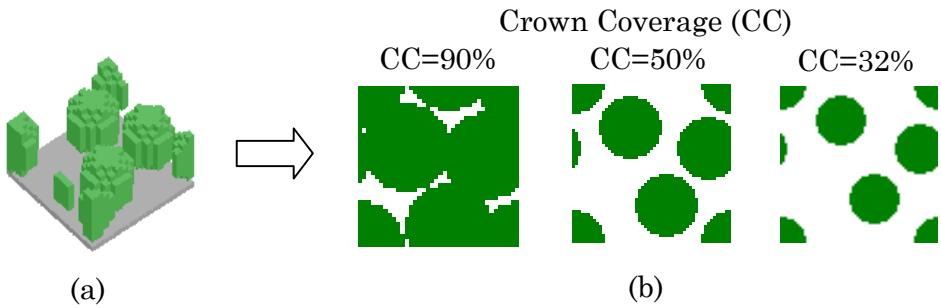



*Figure IV.1 : (a) Maquette avec les 4 arbres. (b) Vue de dessus de la maquette en fonction du taux de couverture arborée (CC).*

La version initiale de la chaîne d'inversion considérait les paramètres libres suivants : densité foliaire $u_f$ des houppiers, le LAI du sous-bois, le taux de couverture arborée ou *Crown Coverage* (CC) et la réflectance du sol ($\rho_{sol}$).

L'inversion ne peut être réalisée si la réflectance spectrale du sol pour chaque canal est un paramètre libre. C'est pourquoi, la réflectance du sol est représentée par une fonction à *n* paramètres :

$$\rho_{sol} = \sum_{i=1}^{n} p_i.\rho_{si}(\lambda_j) \qquad (4.4)$$

Avec *n* compris entre 1 et 3. Cette fonction permet de caractériser différents types de sol et de faire intervenir des facteurs comme l'humidité qui tend à agir de façon linéaire sur tout le spectre visible et proche infrarouge.

Représentation des réflectances simulées avec une fonction mathématique paramétrée

L'algorithme de minimisation nécessite la connaissance des réflectances du couvert forestier pour toutes les valeurs des paramètres libres et fixes dans la gamme de variations considérée. Compte tenu de la contrainte liée au temps de calcul, on calcule

uniquement un nombre limité de ρ pour un ensemble fini de valeurs des paramètres. Ces échantillons sont interpolés pour obtenir les valeurs intermédiaires. Cette interpolation est simple pour des paramètres tels que le LAI ou le taux de couverture. Néanmoins, pour les directions d'éclairement, en raison du phénomène *hot-spot*, une interpolation directe des réflectances est physiquement incohérente. L'interpolation est en fait réalisée en approchant les $\rho(\Omega_v)$ simulés avec une fonction à 8 paramètres $c_i$ . Ainsi, à chaque simulation, ou jeu de paramètres d'entrée, il correspond une fonction analytique définie par un ensemble de coefficients $c_i$ :

$$\rho_{sim}(\theta_v,\Delta\varphi_{sv}) = \left(c_1 + c_2\theta_v\cos(\Delta\varphi_{sv}) + c_3\theta_v^2\cos^2(\Delta\varphi_{sv}) + c_4\theta_v^2\sin^2(\Delta\varphi_{sv}) + c_5\theta_v^4\sin^4(\Delta\varphi_{sv}) + c_6\theta_v^6\sin^6(\Delta\varphi_{sv})\right)\times\left(1 + c_7\exp\left(\frac{-\psi_{sv}^{\ 2}}{c_8^2}\right)\right)$$

$$\Delta\varphi_{sv} = \varphi_s - \varphi_v \quad , \quad \cos(\psi_{sv}) = \Omega_s.\Omega_v$$

Le terme $\left(1 + c_7\exp\left(\frac{-\psi_{sv}^{\ 2}}{c_8^2}\right)\right)$ représente le *hot-spot*, $c_7$ étant la hauteur et $c_8$ la largeur. L'autre terme de $\rho_{sim}$ est une fonction en forme de bol. Les paramètres $c_i$ sont calculés par la méthode des moindres carrés pour chaque canal, angle solaire et valeur de paramètre libre. Chaque simulation DART fournit un FRD et donc un jeu de paramètres $c_i$ qui est stocké dans une table appelée LUT (*Look Up Table*). La validation de cette fonction paramétrique et la méthode d'interpolation utilisée sont décrites dans (Gastellu-Etchegorry *et al.*, 2001).

Minimisation de l'erreur entre les simulations et les mesures

L'étape d'inversion revient à minimiser avec la méthode du simplex (Nelder *et al.*, 1965) la fonction coût ($\varepsilon^2$) représentant l'erreur entre réflectances mesurées ($\rho_i$) et simulées ($\rho_{sim}$). On construit un élément géométrique de dimension $m$+1 (le simplexe) en choisissant $m$+1 points distincts $M_i$ dans un espace de dimension $m$. La fonction coût est calculée pour ces $m$+1 points. La procédure fait alors évoluer le point donnant la valeur maximale de la fonction coût. Pour évoluer, ce point peut effectuer trois mouvements élémentaires par rapport au barycentre $C$ des autres points : une homothétie de rapport 2, -1, ou 0,5 (*Figure IV.2*).

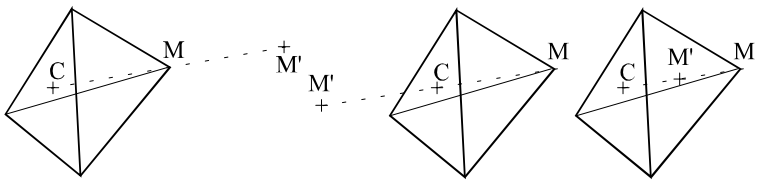



*Figure IV.2 : Les trois opérations élémentaires du simplexe qui transforment le point M (donnant la valeur maximale de la fonction coût) en M'. C est le barycentre des autres points.*

L'algorithme utilise au besoin les trois déplacements pour diminuer la valeur de la fonction coût au point M. Si la diminution n'est pas suffisante, l'algorithme effectue une contraction de rapport 0,5 autour du point donnant la plus faible valeur de la fonction coût. L'arrêt de la procédure s'effectue lorsque l'erreur relative entre les valeurs maximale et minimale de la fonction en ces *m+1* points est inférieure à un seuil fixé par l'opérateur. Par cette méthode, l'algorithme peut s'arrêter sur le premier minimum local trouvé. Ceci est un problème majeur qui peut être résolu par :

- Un choix judicieux des valeurs de départ, qui conditionne le résultat final.
- L'utilisation de plusieurs simplexes initiaux différents, le minimum retenu étant alors le plus petit des minima calculés pour chacun de ces simplexes initiaux.

La carte de l'erreur $\varepsilon^2$ déduite de l'inversion d'images renseigne sur la fiabilité de l'inversion. La fonction $\varepsilon^2$ peut être définie de trois façons :

- *Erreur absolue* :
$$\varepsilon^2 = \sum_{i=1}^{nbval} \left(\rho_i - \rho_{sim,i}\right)^2 \quad (4.5)$$

Où *nbval* est le nombre de réflectances mesurées disponibles.

- *Erreur relative* :
$$\varepsilon^2 = \sum_{i=1}^{nbval} \left( \frac{\rho_i - \rho_{sim,i}}{\rho_i} \right)^2 \quad (4.6)$$

Cette erreur empêche de favoriser les canaux proche infrarouge, car leurs réponses sont généralement supérieures à celles des canaux visible, du moins pour les couverts végétaux.

- *Erreur relative avec seuil* :
$$\varepsilon^2 = \sum_{i=1}^{nbval} \left( \frac{\rho_i - \rho_{sim,i}}{k_i} \right)^2 \quad (4.7)$$

Où $k_i=\rho_{min}$ pré-défini ou $\rho_i$ si $\rho_i \geq \rho_{min}$. Cette fonction coût permet de ne pas favoriser les réflectances proche de 0.

La robustesse de l'inversion a été testée avec une approche théorique. Cette approche a consisté à rajouter un bruit (additif ou proportionnel) à un ensemble de réflectances simulées, puis à réaliser l'inversion sur ces données bruitées. Le bruit additif est associé au capteur radiométrique et le bruit proportionnel aux corrections atmosphériques. La comparaison des paramètres estimés et utilisés en entrée de DART fournit le coefficient de corrélation ($r^2$) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE) de la droite de régression. Cependant, cette approche n'est pas une validation car elle n'est réalisée qu'en comparant des paramètres mesurés sur le terrain et dérivés d'images réelles.

### IV.1.3 Améliorations pour l'extraction de nouveaux paramètres foliaires

La chaîne d'inversion a été améliorée pour permettre l'estimation de deux nouveaux paramètres libres : la concentration en chlorophylle par unité de surface foliaire ($C_{ab}$) et un indice structural N lié à l'architecture interne de la feuille. L'approche repose sur le couplage de DART et du modèle de transfert radiatif foliaire PROSPECT (Jacquemoud et Baret, 1990).

Le modèle PROSPECT simule les propriétés optiques foliaires de 0.4µm à 2.4µm à partir de la composition chimique de la feuille et d'un indice de structure foliaire N, pas nécessairement entier. La feuille est supposée être un empilement de N couches séparées par de fines couches d'air. Si N est réel, par exemple N=2.3, la partie décimale (0.3) pondère l'épaisseur de la troisième couche. Pour une jeune feuille de monocotylédone, N varie entre 1 et 1.5. Pour les dicotylédones, N peut atteindre 2.5 et même 5 pour une feuille sénescente (Jacquemoud, 1992). Les concentrations chimiques utilisées par PROSPECT sont celles de la chlorophylle $C_{ab}$ (en général $C_{ab} < 90$ µg.cm$^{-2}$), de l'eau $C_w$ (cm), de la lignine $C_{lig}$ (g.cm$^{-2}$), des protéines $C_{prot}$ (g.cm$^{-2}$) et de la cellulose $C_{cell}$ (g.cm$^{-2}$). L'interaction d'un rayon avec la surface foliaire est simulée avec les équations de Fresnel (indice de réfraction n(λ)). Les interactions de volume sont décrites par la loi de Beer-Lambert en utilisant un coefficient d'absorption K(λ) fonction des concentrations en chlorophylle, azote, amidon, etc.

$$K(\lambda) = \sum_i C_i.k_i(\lambda) \qquad (4.8)$$

Où $k_i(\lambda)$ est le coefficient d'absorption spécifique et $C_i$ la concentration par unité de surface du composant biochimique *i*).

Les deux paramètres qui déterminent et affectent le plus les propriétés optiques des feuilles dans les domaines spectraux du visible et du proche infrarouge sont $C_{ab}$ et N.

La faisabilité théorique de l'extraction de ces deux paramètres ($C_{ab}$ et N) a été analysée avec un test de robustesse. Pour cela, on considère une seule direction de visée, 3 bandes spectrales (vert : 0.50-0.59 µm, rouge : 0.61-0.68 µm et proche infrarouge : 0.79-0.89 µm), un taux de couvert arboré (CC) de 95% et un sol de réflectance $\rho_s$ égale à 10% dans le vert, 8% dans le rouge et 40% dans le proche infrarouge. Les trois paramètres libres sont $C_{ab}$, N et $u_f$ (densité foliaire cf. § II.1). Cinq simplexes initiaux ont été employés. La fonction coût utilisée correspond à une erreur relative avec un seuil inférieur sur la réflectance $\rho_{min}$= 10%.

| | | Bruit proportionnel | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 0% | 4% | 8% | 10% |
| $C_{ab}$ [10-90 g.cm$^{-2}$] | RMSE | 2.671 | 3.422 | 4.801 | 4.810 |
| | $r^2$ | 0.979 | 0.972 | 0.933 | 0.926 |
| N [1-2.5] | RMSE | 0.180 | 0.204 | 0.215 | 0.227 |
| | $r^2$ | 0.025 | 0.014 | 0.006 | 0.001 |
| $u_f$ [0.2-0.8 m$^{-1}$] | RMSE | 0.041 | 0.090 | 0.096 | 0.126 |
| | $r^2$ | 0.958 | 0.7487 | 0.711 | 0.520 |

*Tableau IV.1: Résultat du test de robustesse.*

Les résultats du test (*Tableau IV.1*) montrent que l'estimation de $C_{ab}$ est théoriquement possible. Ainsi, le coefficient $r^2$ reste supérieur à 90% pour des niveaux de bruit proportionnel allant jusqu'à 10%. De même, pour la densité foliaire $u_f$, $r^2$ est supérieur à 70% pour des niveaux de bruit allant jusqu'à 8%. Par contre, le paramètre structural N ne peut être estimé ($r^2$<5%). Cette impossibilité est due aux tendances inverses de la réflectance ($\rho_f$) et de la transmittance foliaire ($\tau_f$) quand le paramètre N varie (Demarez, 1998). Ainsi, l'augmentation de ce paramètre diminue la transmittance foliaire et augmente la réflectance foliaire. Au niveau du couvert, il en découle une compensation, si bien que la réflectance du couvert change peu d'où une manque de sensibilité à ce paramètre.

### IV.1.4 Méthode d'inversion adaptée aux images à très haute résolution spatiale

Introduction

L'accès aux données de télédétection à très haute résolution spatiale (*i.e.* avec une résolution spatiale ($\Delta$S) de l'ordre du mètre) pour des applications civiles à été bouleversé par une directive émise par la présidence nord-américaine le 10 mars 1994. Cette directive encourageait les initiatives privées à développer des systèmes d'observation de la Terre à très haute résolution spatiale, ouverts aux applications civiles. Une première conséquence a été le lancement en septembre 1999 du satellite *Ikonos* par la société privée *Space Imaging* ($\Delta$S=0.8m pour une visée au nadir).

Nous présentons ici une méthode innovante permettant d'extraire des paramètres biophysiques à partir de ces images à très haute résolution spatiale. L'objectif est

d'utiliser l'information spatiale additionnelle associée aux images à très haute résolution spatiale pour améliorer l'estimation de paramètres biophysiques.

Relation entre les images THR et les paramètres biophysiques

Le passage à une résolution de l'ordre du mètre implique une modification qualitative de l'information contenue dans un pixel. En effet, celui-ci ne contient plus une information radiométrique moyenne associée à un ensemble d'éléments du paysage (arbres, arbustes, etc.) mais une information radiométrique associée à une partie d'un élément du paysage. C'est pourquoi, la majorité des méthodes d'inversion actuelles sont inadaptées. Ce problème est illustré ici par l'analyse de la relation (*Figure IV.3-c*) entre l'indice radiométrique NDVI (Tucker, 1979) et l'expression "1-exp(-LAI/2)" dérivée du LAI. Des images à 1 m et 50 m de résolution ont été simulées par DART dans les domaines visible et proche infrarouge (*Fig. IV.3-b*). Nous avons dérivé de ces images les cartes du NDVI et de "1-exp(-LAI/2)" à la même résolution.

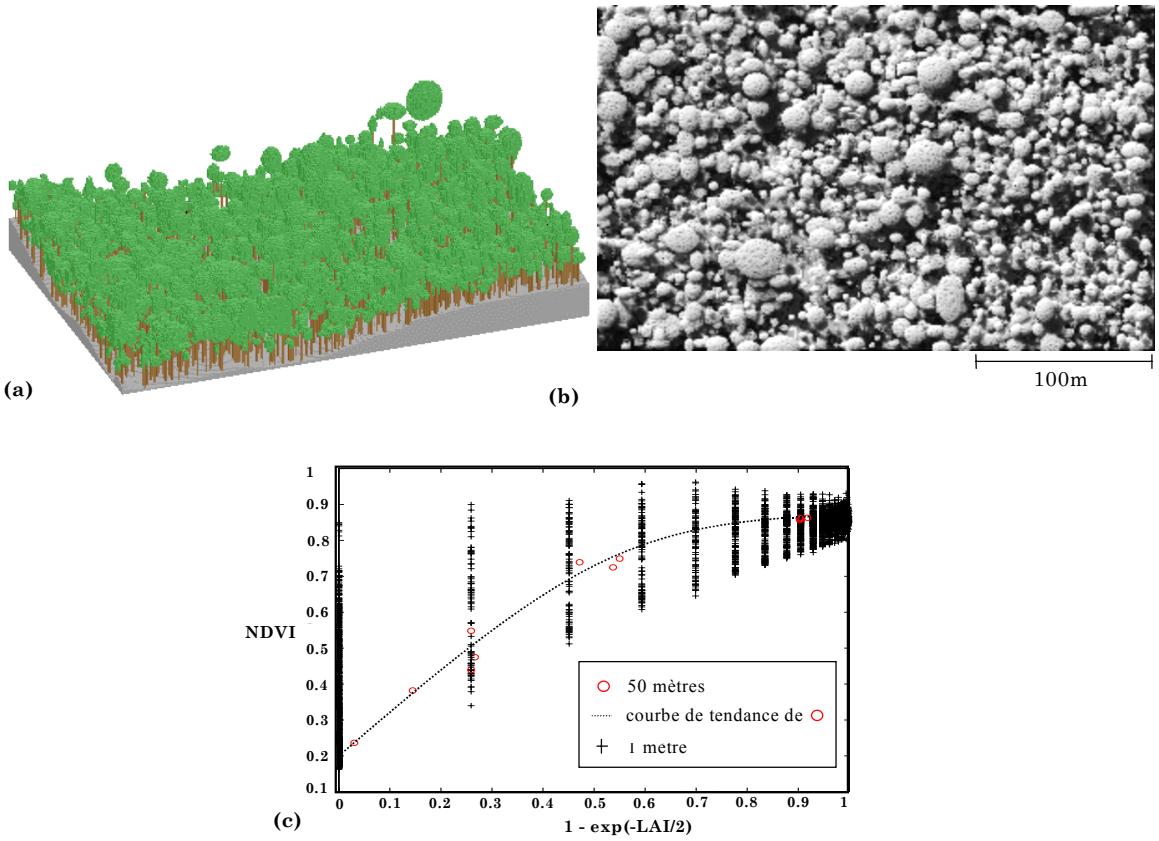



*Figure IV.3 : (a) Maquette de forêt tropicale définie à partir de mesures terrain (Trichon et al., 1996). (b) Simulation DART dans le proche infrarouge avec une résolution d'un mètre; (c) Relation entre le NDVI et (1-exp(LAI/2)) à 50 m (o) et 1m (+) de résolution.*

Le coefficient de corrélation est élevé ($r^2$=0.96) pour l'image avec des pixels de 50 mètres de résolution. Par contre, il est faible ($r^2$=0.47) si la résolution des pixels vaut 1 mètre.

En effet, pour tout LAI de la parcelle, le NDVI des pixels associés à la couronne des arbres est très variable. Ceci souligne la difficulté d'établir des relations entre les mesures radiométriques THR et les paramètres biophysiques. Des méthodes adaptées aux images THR doivent donc être crées. C'est dans ce contexte que se situe la méthode d'inversion THR développée dans cette thèse, méthode qui combine des techniques classiques de traitement d'image et l'inversion du modèle DART.

Description de la méthode d'inversion THR

La méthode comprend quatre étapes majeures :

(1) Segmentation des images à traiter.

(2) Classification des images à traiter.

(3) Simulations DART pour créer une table de réflectances pré-calculées (LUT).

(4) Estimation des paramètres recherchés avec la méthode d'inversion.

La méthode d'inversion THR est présentée ici pour le cas particulier de l'estimation de paramètres biophysiques forestiers à partir d'images THR dans les domaines VIS et PIR.

*(1) Segmentation des images :* L'image THR est segmentée en zones homogènes juxtaposées. Chaque zone sera caractérisée par un jeu unique de paramètres. L'idée est d'appliquer la méthode d'inversion non pas pixel par pixel, mais à des radiométries moyennes issues de chaque zone homogène. Dans l'état actuel de développement, la segmentation des images est effectuée manuellement.

*(2) Classification des images :* L'image THR de chaque zone est classée (Ducrot, 2000) selon les 4 classes suivantes : houppier éclairé (HE), houppier à l'ombre (HO), sol/sous-bois éclairé (SE) et sol/sous-bois à l'ombre (SO) (*Figure IV.5*).

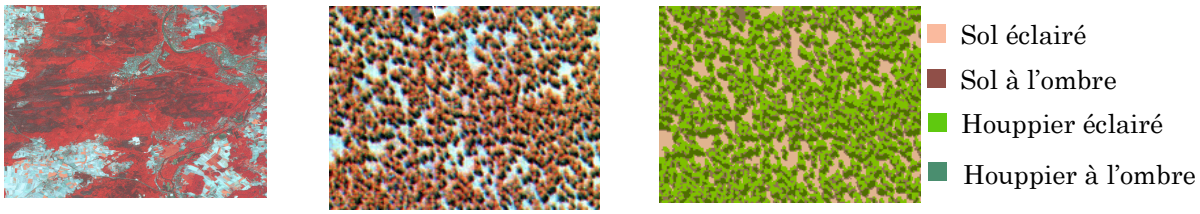



Image THR de la forêt | Image d'une parcelle | Résultat de la classification

*Figure IV.4 : Images des différentes étapes de la segmentation et classification.*

La classification est utilisée pour déterminer la réflectance moyenne des pixels houppier de chaque zone. Ainsi, la réflectance moyenne des pixels des classes HE et

HO donne la réflectance moyenne des houppiers de chaque zone homogène ($\rho_{houppier}$). La classification peut aussi permettre de déterminer des paramètres qui, par la suite, pourront être considérés comme des paramètres fixes ($G_{Fi}$) : taux de couverture arborée (CC), réflectance du sous-bois ($\rho_{sousbois}$), diamètre moyen des houppiers des arbres ($d_{arbre}$) et hauteur moyenne des arbres ($h_{arbre}$). CC est estimé en tant que simple proportion du nombre de pixels de type houppier (éclairé et à l'ombre) de la classification par rapport au nombre total de pixels. Le sous-bois est supposé être lambertien avec une réflectance égale à la moyenne des pixels SE. Le paramètre $d_{arbre}$ peut être déterminé en le mesurant directement sur l'image, compte tenu de l'angle zénithal de visée. Le paramètre $h_{arbre}$ peut être obtenu indirectement pour les forêts éparses à partir de la mesure de l'ombre portée des arbres.

(3) *Création d'une table de réflectances pré-calculées (LUT).* Les réflectances sont celles des houppiers ($\rho_{houppier,sim}$). Ces dernières sont déterminées à partir des images simulées avec le modèle couplé DART-PROSPECT, en effectuant la moyenne de la réflectance de tous les pixels associés aux cellules *Houppier*. La représentation informatique du paysage utilisée pour le calcul de ces réflectances est la maquette "4 arbres" (*cf.* § IV.1). Les deux paramètres libres ($G_{Li}$) considérés ici avec des images multispectrales visible et proche infrarouge sont la densité foliaire $u_f$ des arbres et la concentration en chlorophylle des feuilles ($C_{ab}$). Le LAI des arbres ($LAI_{arbre}$) dépend de $u_f$ et des dimensions des houppiers.

(4) *Inversion*. L'emploi combiné du LUT de l'étape (3) et de la procédure d'inversion décrite dans le chapitre *IV.1.3* permet d'obtenir une carte des paramètres biophysiques ($LAI_{arbre}$, $C_{ab}$, CC, etc.) pour chaque zone homogène de la forêt.

## IV.2 Application pour la Forêt de Fontainebleau

L'objectif a été d'extraire à partir d'images multispectrales des paramètres biophysiques (LAI des arbres, CC, $C_{ab}$) de la Forêt de Fontainebleau. Ces paramètres sont utiles pour la modélisation du fonctionnement de la forêt. Ainsi, le laboratoire ESE (Écologie, Systématique et Évolution) d'Orsay (France) les utilise comme paramètres d'entrée de modèles décrivant le fonctionnement, la transpiration, la respiration, les flux d'eau et les flux de $CO_2$ du couvert forestier.

### IV.2.1 Forêt de Fontainebleau

Située au sud-est de Paris (48°25'N, 2°40'E), la Forêt de Fontainebleau couvre une surface de 17000 hectares (*Figure IV.5*). Elle est divisée en parcelles assez homogènes dans leur composition et leur état de développement. Les espèces dominantes sont les chênes (*Quercus Petraea* et *Quercus Robur*), le hêtre (*Fagus Sylvatica*) et le pin sylvestre (*Pinus Sylvestris*). Les espèces du sous-étage sont le charme (*Carpinus Betulus*) et le bouleau (*Betula Pendula*). Le développement des parcelles va du fourré de quelques années et de faible hauteur, jusqu'à la futaie de plusieurs dizaines d'années avec une hauteur supérieure à 15m.

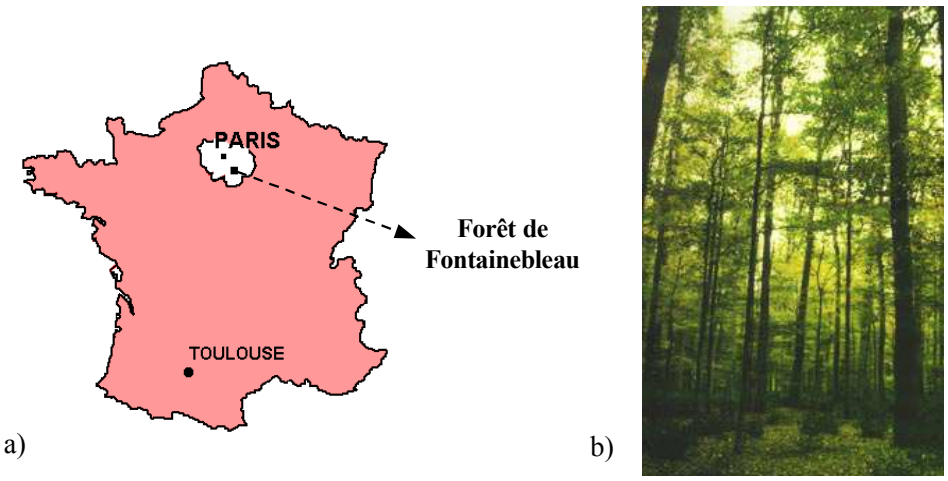



*Figure IV.5 : Localisation (a) et photographie d'une parcelle (b) de la Forêt de Fontainebleau.*

### IV.2.2 Données utilisées

Deux types d'images de la forêt de Fontainebleau, acquises par les satellites SPOT et *Ikonos,* étaient disponibles (*Figure IV.6*) :

- 13 images SPOT acquises par la société SPOT Image entre 1989 et 2000 (*Tableau IV.2*). Ces images comprennent 3 canaux : vert (XS1 : 0.50µm - 0.59µm), rouge (XS2 : 0.61µm - 0.68µm) et proche infrarouge (XS3 : 0.79µm - 0.89µm). Elles sont codées pour chaque pixel sur 8 bits et leur résolution spatiale est de 20m.

- Une acquisition du satellite *Ikonos* le 16 août 2000. Cette acquisition comprend une image panchromatique (PAN) à 1m de résolution, 1 image multispectrale (MS) à 4m de résolution et l'image fusionnée (P+MS) échantillonnée à 1m de résolution. L'image multispectrale est composée de 4 canaux : bleu (0.45µm - 0.51µm), vert (0.51µm - 0.59µm), rouge (0.63µm - 0.69µm) et proche infrarouge (0.76µm - 0.84µm) (*Figure*

*IV.7*). L'image panchromatique couvre le domaine spectral 0.45µm-0.90µm. Les images sont codées pour chaque pixel sur 11 bits. La configuration d'acquisition est $\theta_s$=26.8°, $\theta_v$= 36.8°, $\Delta\varphi$=278.3°.

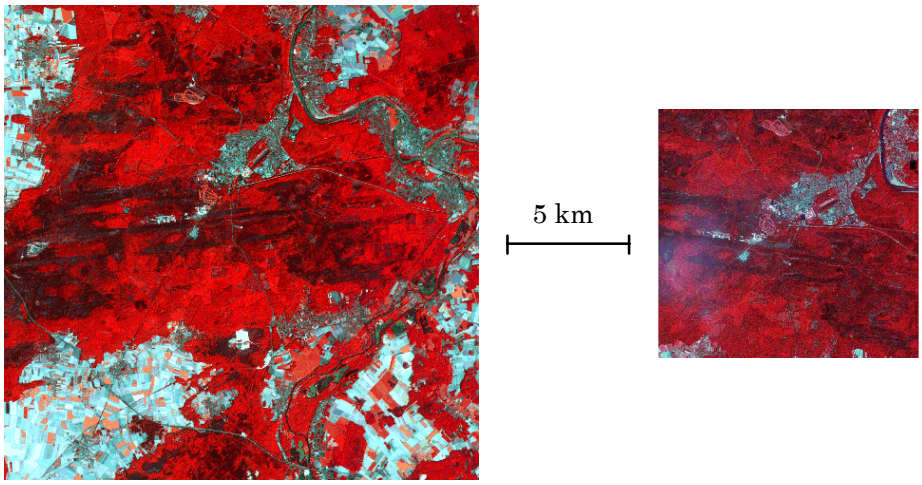



*Figure IV.6 : Compositions colorées RGB SPOT (gauche) et Ikonos (droite) de la forêt.*

| Date | Heure (UTM) | $\theta_s$ | $\varphi_s$ | $\theta_v$ | $\varphi_v$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 09/09/1989 | 10h53'17 " | 42.2 | 161.0 | 6.7 | 282.4 |
| 11/10/1990 | 11h09'20 " | 55.6 | 172.0 | 13.8 | 104.9 |
| 30/08/1991 | 10h57'53 " | 40.5 | 160.2 | 1.7 | 283.0 |
| 25/08/1992 | 11h13'55 " | 38.4 | 165.4 | 24.1 | 106.4 |
| 28/06/1993 | 10h55'45 " | 27.4 | 151.5 | 1.4 | 283.1 |
| 10/07/1994 | 11h00'40 " | 28.0 | 153.5 | 4.3 | 103.7 |
| 10/07/1995 | 10h41'07 " | 29.7 | 144.9 | 21.7 | 280.4 |
| 17/07/1996 | 11h07'00 " | 28.7 | 156.6 | 14.8 | 105.0 |
| 13/08/1997 | 10h53'39 " | 35.5 | 154.6 | 3.9 | 103.8 |
| 06/08/1998 | 11h16'01 " | 32.3 | 162.5 | 23.7 | 106.4 |
| 21/07/2000 | 11h09'19 " | 29.4 | 157.1 | 12.0 | 104.8 |

*Tableau IV.2 : Principales caractéristiques des images SPOT étudiées.*

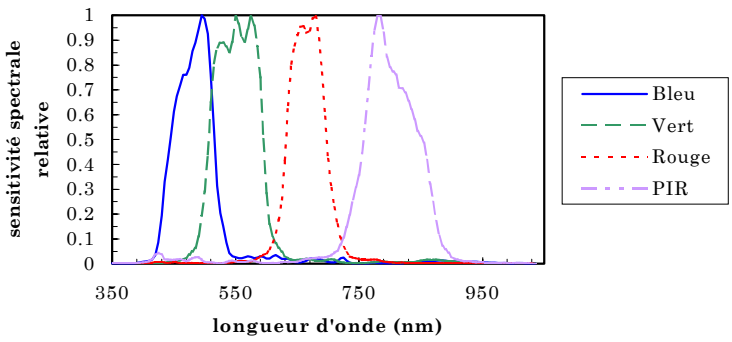



*Figure IV.7 : Réponse spectrale des filtres bleu, vert, rouge et proche infrarouge d'Ikonos.*

La correction atmosphérique des images SPOT a été réalisée en deux étapes. L'image SPOT de 1994 a tout d'abord été corrigée (Estève, 1998) à l'aide de mesures *in situ* (visibilité, profil en température, pression, etc.) et du modèle 6S (Vermote *et al.*, 1998). Elle a ensuite servi de référence pour corriger les autres images avec la loi linéaire $\rho_{BOA} = a.CN + b$, où CN est le compte numérique brut. Les coefficients a et b ont été calculés à l'aide de 3 zones (parking asphalté, carrière et surface d'eau) dont la réflectance BOA a été supposée stable parmi toutes les images SPOT. Cette normalisation linéaire a été validée en la comparant à celle utilisant une correction 6S similaire à celle utilisée pour l'image de 1994. Les différences de réflectance étaient comprises entre –2% et 1% en absolu pour 98% des pixels de la forêt et pour tous les canaux.

Mesures terrain

Le LAI de 38 parcelles de feuillus et de 13 parcelles de pin de la forêt de Fontainebleau a été mesuré par le laboratoire ESE (Dufrêne *et al.*,1997) en 1994, 1995, 1996, 1997, 1998 et 2000 durant la période de plein développement foliaire (*i.e.* quand le LAI se stabilise en atteignant sa valeur maximale). Ces mesures ont été effectuées grâce à un appareil, LICOR LAI 2000 (Li-Cor Inc., Lincoln, Neb, USA), qui estime le LAI à partir de mesures du rayonnement solaire. Les valeurs de LAI estimées avec cet appareil sont obtenues en considérant que le couvert est un milieu turbide et homogène.

Données annexes

Nous disposions d'une carte des parcelles de la forêt fourni par l'ONF (Office National des Forêts) ainsi qu'une table de données sur les arbres (âge, espèces, etc.). Toutes les données utilisées ont été intégrées dans un SIG (Système d'Information Géographique).

### IV.2.3 Inversion de DART avec les images SPOT

Choix des paramètres libres et fixes

Le fait que la Forêt de Fontainebleau soit composée de parcelles caractérisées par des espèces à des stades de développement différents complique le choix des paramètres fixes, car toute parcelle a des propriétés foliaires et structurelles bien spécifiques. La prise en compte de toutes ces particularités requiert un grand nombre de modélisations du paysage. Pour simplifier l'application de l'inversion et rendre celle-ci opérationnelle nous considérons une seule représentation informatique du paysage. De ce fait,

l'inversion n'est pas optimale pour toutes les espèces et configurations architecturales présentes.

Les trois bandes spectrales des images SPOT permettent de laisser comme paramètres libres la densité foliaire des arbres $u_f$ et le taux de couverture arborée CC. Les cartes de LAI sont obtenues à partir de ces deux paramètres décorrélés (entre eux) et variables.

En théorie, la disponibilité de trois bandes spectrales permettrait de définir un troisième paramètre libre (*e.g.*, la réflectance du sol). En fait, des essais avec la réflectance du sol comme paramètre libre conduisent à une forte augmentation de la sensibilité au bruit sans apporter des améliorations significatives au niveau des cartes de LAI obtenues (Estève, 1998).

L'ajustement de DART aux réflectances maximales dans le proche infrarouge de parcelles de hêtres avec un taux de couverture de 100% a permis de fixer la réflectance ($\rho_f$) et la transmittance ($\tau_f$) foliaires à 10%, 6% et 48% respectivement pour les canaux XS1, XS2 et XS3.

Calcul de la table de simulations

La LUT qui relie les réflectances et les paramètres biophysiques est réalisé avec :

*Paramètres libres :*

- 3 valeurs de densité foliaire des houppiers $u_f$ : 0.2, 0.4 et 0.8 $m^2/m^3$.

  4 valeurs de taux de recouvrement arboré CC : 0%, 45%, 75% et 100%.

*Paramètres fixes :*

- 3 configurations solaires ($\theta_s$=20°,30° et 40°).
- Éclairement atmosphérique isotrope avec un SKYL (proportion d'éclairement diffus sur l'éclairement total au-dessus du paysage) simulé par 6S pour une visibilité de 15 km et une atmosphère type d'un site continental tempéré.
- Réflectance du sol ($\rho_{sol}$) : 5%, 7% et 8% respectivement pour les canaux XS1, XS2 et XS3. Ces valeurs, supposées représentatives du sous-bois de la forêt de Fontainebleau, sont issues de Estève (1998).
- Représentation informatique du paysage avec un motif répétitif de 4 arbres ayant un houppier ellipsoïdal de hauteur 15m et de diamètre 10.5m.

Un test de robustesse a permis de vérifier la faisabilité théorique de l'extraction du LAI, $u_f$ et CC avec les données disponibles. Ceci a été réalisé en introduisant un bruit additif de 0%, 1% et 5%, ainsi qu'un bruit proportionnel de 5% et 10%. Ces tests ont aidé à la définition de certains paramètres de l'algorithme d'inversion : seuil d'arrêt du RMSE à 0.001 et 5 simplexes initiaux.

| | | **Bruit** | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **Additif** | | | **Proportionnel** | |
| | | **0%** | **1%** | **5%** | **5%** | **10%** |
| **CC [0-100%]** | **RMSE** | 0.019 | 0.117 | 0.151 | 0.051 | 0.071 |
| | **$r^2$** | 0.988 | 0.885 | 0.764 | 0.968 | 0.942 |
| **$u_f$ [0.2-0.8]** | **RMSE** | 0.077 | 0.225 | 0.344 | 0.291 | 0.355 |
| | **$r^2$** | 0.658 | 0.051 | 0.001 | 0.277 | 0.099 |
| **LAI [0-9]** | **RMSE** | 0.091 | 0.712 | 0.986 | 0.481 | 0.729 |
| | **$r^2$** | 0.973 | 0.814 | 0.713 | 0.923 | 0.862 |

*Tableau IV.3 : Résultat du test de robustesse de l'algorithme utilisé pour la configuration d'acquisition associée à l'image SPOT de l'année 2000.*

Les résultats du test (*Tableau IV.3*) montrent que CC est un paramètre qui peut être déterminé de façon robuste avec des coefficients de corrélation qui restent supérieurs à 75% pour tous les niveaux de bruit considérés. Par contre, l'extraction de $u_f$ est difficile, surtout pour les faibles CC. Cependant, le LAI des arbres, qui est lié à $u_f$ et CC, a un bon niveau de corrélation ($r^2$>70%).

Inversion et résultats

L'inversion est réalisée en utilisant une erreur relative avec un seuil inférieur sur la réflectance fixé à 10%. Elle a fourni des cartes de LAI, CC, $u_f$ et $\varepsilon^2$ (*Figure IV.8*). Les zones où $\varepsilon^2$ dépasse 12% sont masquées sur les cartes, ce qui élimine assez bien les zones dont la réflectance diffère notablement de la réflectance d'une forêt (routes, bâtiments, champs agricoles, etc.). Les cartes de LAI ont été obtenues pour toutes les images SPOT (*Figure IV.10*).

La validation de ces cartes a été réalisée en comparant le LAI de ces parcelles avec le LAI mesuré *in situ*, pour les années disponibles. La *Figure IV.9* présente les résultats de la validation obtenus pour les images de 1998 et 2000. Les erreurs quadratiques moyennes (RMSE) entre le LAI mesuré et le LAI inversé sont présentées dans le *Tableau IV.4*. On constate une similitude entre les erreurs obtenues pour les inversions réalisées avec la version 1996 (Estève, 1998) et celles avec la version 2001 du modèle DART.

| Année | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 2000 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| RMSE (DART v2001) | 1.25 | 1.40 | 1.18 | 1.36 | 1.38 | 1.12 |
| RMSE (Estève, 1998) | 1.30 | 1.51 | 1.12 | 1.38 | - | - |

*Tableau IV.4 : Erreurs sur le LAI estimées avec la version DART 2001 et avec la version 1996.*

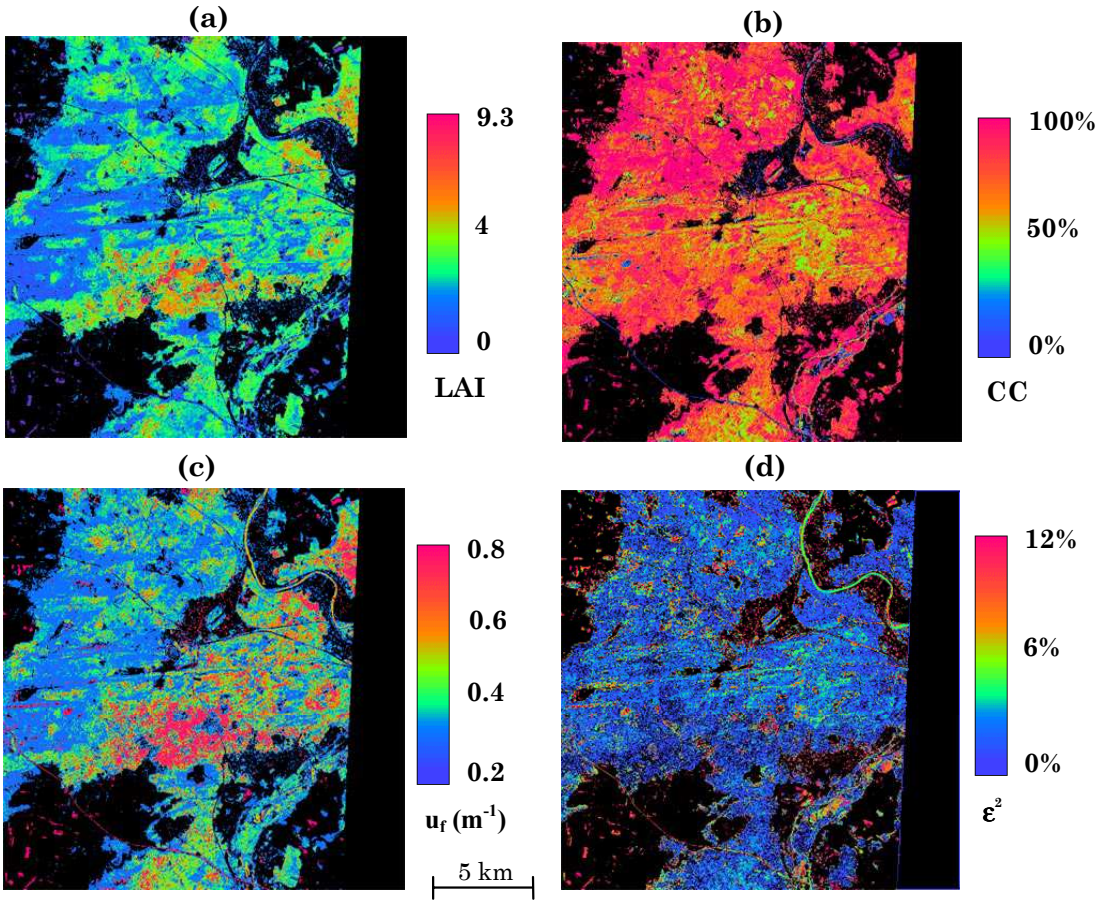



*Figure IV.8 : Résultats du processus d'inversion pour l'image SPOT de l'année 2000. LAI (a), CC (b), $u_f$ (c) et $\varepsilon^2$ (d).*

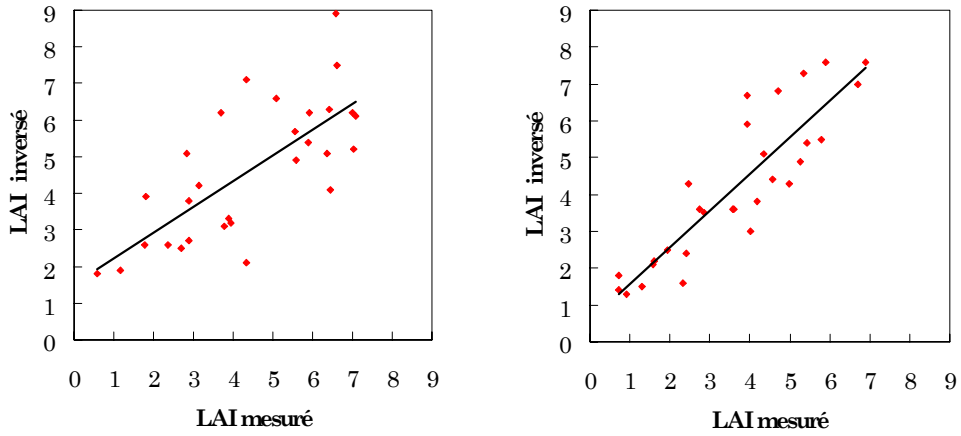
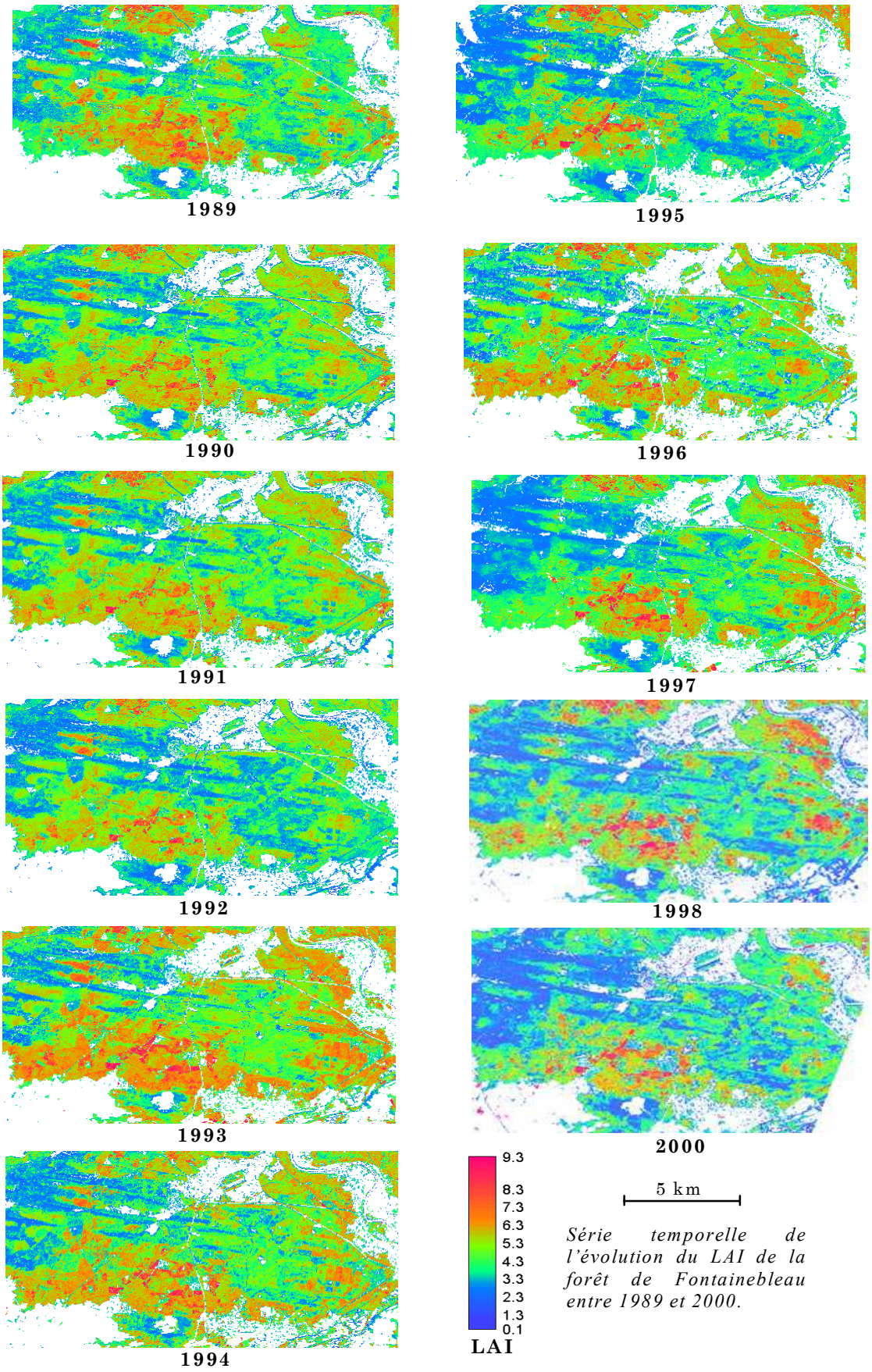



*Figure IV.9 : Relation entre le LAI estimé par inversion et le LAI mesuré pour les années 1998 (gauche) et 2000 (droite). La RMSE de 1998 est estimée à 1.38 et celle de 2000 à 1.12.*




*Série temporelle de l'évolution du LAI de la forêt de Fontainebleau entre 1989 et 2000.*

*Figure IV.10*

Analyse de l'effet des tempêtes de décembre 1999

Le 26 décembre 1999, une forte tempête dénommée "Lothar" avec des vents entre 150 et 200 km/h s'est abattue sur la forêt de Fontainebleau en produisant de gros dégâts. Les grands arbres et ceux particulièrement fragilisés par leur état ou implantation géographique sur des zones plus exposées aux forts vents sont devenus des chablis (*Figure IV.11*). Les grands résineux ont été spécialement touchés en raison de leur feuillage qui offre encore plus de surface au vent. Ainsi, beaucoup d'arbres ont été abattus quel que soit le sol où ils étaient implantés.

*Figure IV.11 : Images des dégâts dus à la tempête de décembre 1999 sur une parcelle de chênes (source : Association des Amis de la Forêt de Fontainebleau).*

Les effets de la tempête ont été analysés avec les cartes de LAI déduites d'images SPOT acquises au moment du développement foliaire maximal. Il a été constaté une forte diminution du LAI des parcelles étudiées entre l'image de 1998 et celle de 2000 (*Figure IV.12*).

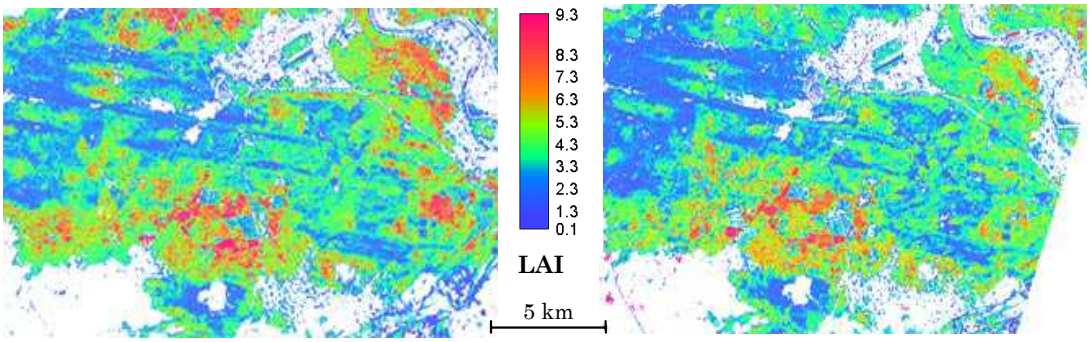



*Figure IV.12 : Cartes de LAI avant (gauche) et après (droite) la tempête de décembre 1999.*

Cette diminution du LAI a été quantifiée en tant que variation moyenne (VM) du LAI des parcelles par rapport aux valeurs du LAI de l'année 1998 :

$$VM = \frac{\sum_{i=1}^{nbparc} (LAI_{XXXX,i} - LAI_{1998,i})}{nbparc} \quad (4.1)$$

où *nbparc* est le nombre de parcelles comparées et $LAI_{XXXX,i}$ est le LAI de la parcelle (i) pour une certaine année.

La VM de 2000 est de -0.89 pour les mesures terrain et de -0.52 pour les résultats de l'inversion. Cette variation en valeur absolue est sensiblement supérieure à celle entre d'une part 1998 et d'autre part 1994, 1995, 1996 et 1997. VM est alors au plus -0.24. Le RMSE du LAI estimé par inversion (1.38 pour 1998 et 1.12 pour 2000) est cependant très supérieur à la variation moyenne du LAI des parcelles (VM) pour toutes les années (*Figure IV.13*).

Si on considère les mesures terrain comme exactes, ces résultats montrent que l'inversion n'est pas suffisamment précise pour bien quantifier les effets de la tempête au niveau d'une parcelle particulière. Cependant, l'inversion permet de détecter la diminution du LAI moyen des parcelles.

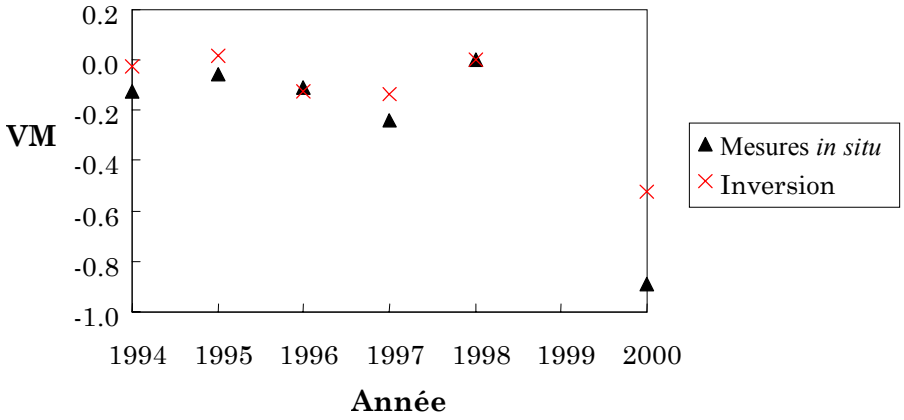



*Figure IV.13 : Comparaison entre les évolutions de la variation moyenne (VM) du LAI mesurée sur le terrain et inversé.*

### IV.2.4 Inversion de DART avec les images Ikonos

La procédure d'extraction avec des images THR est appliquée à trois parcelles de la forêt de Fontainebleau appelées CH5, C11 et C22 (*Figure IV.14*). CH5 contient à la fois des chênes et des hêtres, alors que C11 et C22 contiennent principalement des chênes. Ces trois parcelles ont été sélectionnées car elles ont des densités bien distinctes. Les paramètres recherchés avec la méthode d'inversion THR sont LAI, CC et $C_{ab}$.

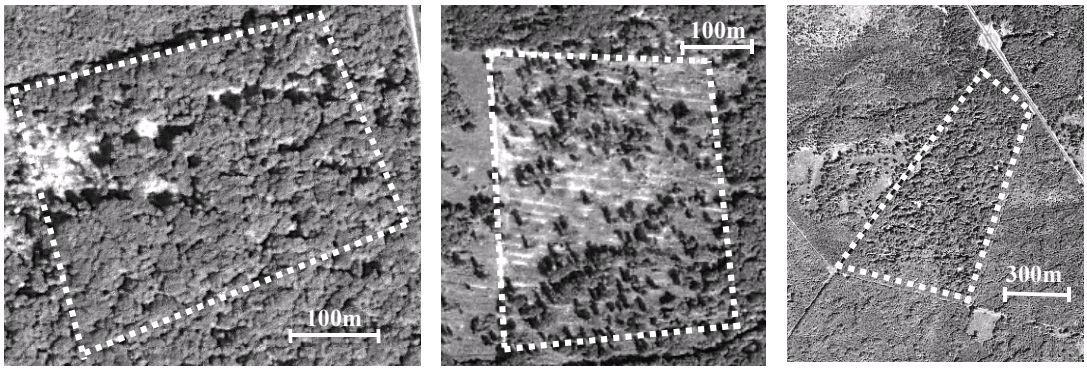



*Figure IV.14 : Images des parcelles CH5, C11 et C22. Bande rouge de l'image fusionnée P+MS.*

L'image fusionnée a été classée pour distinguer les pixels associés au sol et sous-bois (SE et SO) de ceux associés aux arbres (HE et HO). L'angle de visée étant suffisamment proche du nadir, cette classification fournit directement le taux de couverture arborée (CC) de chaque parcelle : 84% pour CH5, 43% pour C11 et 92% pour C22. Les dimensions moyennes des arbres des parcelles CH5 ($d_{tree}$=17.3 m et $h_{tree}$=29 m) et C11 ($d_{tree}$=18.1 et $h_{tree}$=33 m) proviennent de mesures terrain (Proisy, 1999). Pour la parcelle C22, les dimensions de la couronne sont directement estimées avec l'image panchromatique à 1 mètre de résolution ($d_{tree}$=17.5 m et $h_{tree}$=30 m). Le rapport entre la hauteur et le diamètre de l'ellipsoïde de la couronne a été fixé à 2. Cette valeur est approximativement celle d'un hêtre qui a poussé dans une forêt dense (Nicolini *et al.*, 1997). Des valeurs moyennes sont fixées pour les paramètres biochimiques du modèle PROSPECT : $C_w$ = 0.01 cm, $C_{lig}$ = 0.015 g.cm$^{-2}$, $C_{prot}$ = 0.11 g.cm$^{-2}$ et $C_{cell}$=0.009 g.cm$^{-2}$ (Khanna et Ulrich, 1991).

La robustesse de l'inversion est testée sur les parcelles CH5, C11 et C22. Les résultats (*Tableau IV.5*) montrent que $u_f$ et $C_{ab}$ sont théoriquement déterminables. En effet, le $r^2$ reste supérieur à 70% pour des bruits proportionnels jusqu'à 8%.

| | | **Bruit proportionnel** | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **0%** | **4%** | **8%** | **10%** |
| **Cab [10-90]** | **RMSE** | 2.671 | 3.422 | 4.801 | 4.810 |
| | **$r^2$** | 0.979 | 0.972 | 0.933 | 0.926 |
| **N [1.5-2.5]** | **RMSE** | 0.180 | 0.204 | 0.215 | 0.227 |
| | **$r^2$** | 0.025 | 0.014 | 0.006 | 0.001 |
| **$u_f$ [0.2-0.8]** | **RMSE** | 0.041 | 0.090 | 0.096 | 0.126 |
| | **$r^2$** | 0.958 | 0.7487 | 0.711 | 0.520 |

*Tableau IV.5 : Résultat du test de robustesse pour l'inversion de la parcelle CH5.*

La méthode d'inversion à basse résolution a aussi été appliquée sur la réflectance moyenne des parcelles et à l'image dégradée à 20 m de résolution. Les images à 20 m de résolution et la réflectance moyenne des parcelles ont été calculées à partir de moyennes sur l'image *Ikonos*. Les réflectances des feuilles et du sol ont été fixées aux valeurs données au chapitre IV.4.4. Les Tableaux *IV.6* et *IV.7* résument les résultats obtenus.

Si on considère la valeur de CC dérivée de l'image THR comme la plus proche de la réalité, il apparaît que la valeur de CC dérivée d'images à 20m de résolution est sous-estimée quand CC est élevé et qu'elle est surestimée quand CC est faible. Selon Hu *et al.* (2000), ce type d'erreurs semble être surtout dû à l'imprécision des réflectance fixées pour le sol.

| | **CH5** | **C11** | **C22** |
|---|---|---|---|
| Inversion DART pour THR (1m) | 84% | 43% | 92% |
| Inversion DART (20m) | 70% | 60% | 66% |
| Inversion DART (moyenne parcelles) | 72% | 89% | 81% |

*Tableau IV.6 : CC obtenu avec les différentes méthodes et résolutions.*

La meilleure estimation du LAI est obtenue avec la méthode d'inversion THR. Ceci peut être expliqué par une meilleure estimation du paramètre CC. De plus, l'impact du sous-bois est réduit, car seuls les pixels associés aux arbres sont considérés. Comme pour CC, le LAI des arbres est sous-estimé pour les forts LAI et surestimé pour les faibles LAI.

| | **CH5** | **C11** | **C22** |
|---|---|---|---|
| Inversion DART pour THR (1m) | 5.14 | 1.98 | 5.31 |
| Inversion DART (20m) | 4.11 | 2.27 | 4.47 |
| Inversion DART (moyenne parcelles) | 4.44 | 2.94 | 5.12 |
| ***MESURES TERRAIN*** | ***5.25*** | ***0.91*** | ***5.90*** |

*Tableau IV.7 : LAI obtenu avec les différentes méthodes et résolutions.*

L'estimation du paramètre $C_{ab}$ avec la méthode à 1 mètre donne des valeurs proches de celles trouvées dans la littérature (Dufrêne *et al.*, 1997) pour les trois parcelles considérées : 80 $\mu g.cm^{-2}$ pour CH5, 55 $\mu g.cm^{-2}$ pour C11 et 71 $\mu g.cm^{-2}$ pour C22.

## IV.3 Conclusion

Les résultats ont montré la fiabilité de la méthode d'inversion du modèle DART en vue de l'obtention de cartes de l'indice foliaire et du taux de recouvrement arboré. Ainsi, une première méthode générale a permis d'estimer, à partir d'images SPOT, l'évolution temporelle sur onze années de l'indice foliaire de la forêt de Fontainebleau entre 1989 et 2000. Néanmoins, les résultats ont mis en évidence les limites de l'inversion pour une

détection précise au niveau d'une parcelle individuelle. En effet, les faibles variations du LAI d'une parcelle sont difficiles à déterminer compte tenu de la forte erreur intrinsèque du processus d'extraction. C'est pourquoi, la variation du LAI n'a pu être évaluée que pour la valeur moyenne du LAI sur l'ensemble de parcelles échantillonnées.

D'autre part, une méthode innovante adaptée aux images à très haute résolution spatiale a été développée. Cette méthode a donné des résultats préliminaires encourageants pour l'extraction de deux paramètres (LAI et le taux de couverture arborée) à partir d'images acquises par le satellite *Ikonos*. Par contre, l'extraction de la concentration en chlorophylle des feuilles et l'indice structural N restent à valider en raison de l'absence de mesures terrain. Cependant, la faisabilité de la stricte inversion du modèle a été validée en utilisant les tests de robustesse. D'autre part et contrairement à la méthode générale d'inversion d'images à basse et moyenne résolution, elle nécessite encore des nombreux développements en vue d'une utilisation opérationnelle. Ces améliorations concernent en particulier l'automatisation et l'optimisation des processus de segmentation, la classification et la détermination des paramètres fixes de la forêt. Par exemple, il serait certainement intéressant d'utiliser une méthode de classification qui donne les proportions des différentes unités du paysage présentes (*e.g.* les classes houppier éclairé, houppier à l'ombre, sol éclairé, sol à l'ombre) à l'intérieur de chaque pixel (Lelong, 1999).

# CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

L'objectif de cette thèse était d'améliorer et de mettre en œuvre un modèle physique pour la simulation d'images de télédétection optique, dans le domaine du rayonnement solaire réfléchi, pour tout type de paysage (naturel ou artificiel) et à toutes les résolutions spatiales des capteurs spatiaux actuels.

Désormais, le nouveau modèle DART simule les trois sous-systèmes qui déterminent l'image de télédétection : le paysage terrestre, l'atmosphère et le capteur radiométrique. Le transfert radiatif à l'intérieur du paysage terrestre et de l'atmosphère est simulé par suivi de rayons à l'intérieur du milieu discrétisé (*cf.* § I.2). Cette méthode permet de simuler des images de zones étendues tout en conservant des temps de calcul relativement faibles (*cf.* § I.5).

L'intérêt de l'amélioration de la modélisation du transfert radiatif dans la végétation a été souligné par l'expérience RAMI d'intercomparaison de modèles (Pinty *et al.*, 2001). En effet, des divergences au niveau de la réflectance (jusqu'à 11.1% en relatif) ont été constatées par rapport à d'autres modèles (*Flight* de North (1996), *Sprint* de Thompson et Goel (1998) et *Raytran* de Govaerts et Verstraete (1998)). Par suite, certaines hypothèses utilisées pour modéliser le transfert radiatif ont été remises en cause. Ainsi, il a été développé de nouvelles approximations concernant la position du barycentre énergétique des cellules, la prise en compte de l'impact de l'anisotropie du rayonnement incident sur la distribution angulaire des diffusions multiples et sur la position du point d'émission associé. Ces modifications ont diminué les écarts relatifs à un maximum de 3.2%. Ce résultat n'est pas en soi une preuve de l'exactitude du modèle. Cependant, il montre le bon accord entre les modèles tridimensionnels confrontés. Le principal intérêt de DART, par rapport aux autres modèles tridimensionnels, est de simuler des images et d'intégrer la simulation du transfert radiatif atmosphérique.

La modélisation des surfaces opaques a aussi été améliorée. Ainsi, la nouvelle version du modèle permet de discrétiser toutes les surfaces opaques comme une juxtaposition de triangles et de parallélogrammes. Ce développement a permis de mieux traiter le sol accidenté et les paysages urbains. La validité de cette approche a été testée avec succès

à l'aide d'une comparaison entre des mesures aéroportées d'un site urbain et des simulations DART de la même zone.

Le modèle DART permet désormais d'avoir une simulation intégrée du transfert radiatif dans le paysage et l'atmosphère. Par suite, il prend beaucoup mieux en compte des phénomènes physiques tels que l'anisotropie de l'éclairement solaire en bas de l'atmosphère, l'hétérogénéité spatiale de l'éclairement de couplage ou la contribution de l'air qui environne tout paysage terrestre. L'exactitude de la modélisation a été évaluée par comparaison aux modèles 6S de Vermote *et al.*(1996), AMARTIS de Miesch (1999) et 6S+DART de Gascon *et al.*(2001).

Le modèle DART peut aussi être inversé pour évaluer à partir d'images de télédétection certains paramètres biophysiques. Dans cette thèse nous avons ainsi obtenu à partir d'images SPOT un jeu de cartes qui montrent l'évolution de l'indice foliaire (LAI) de la forêt de Fontainebleau entre 1989 et 2000. Néanmoins, les résultats obtenus ont montré les limites de l'inversion pour une détection précise au niveau d'une parcelle individuelle. En effet, pour une parcelle individuelle les variations du LAI sont souvent faibles devant l'erreur intrinsèque du processus d'extraction. Ainsi, seules les variations de la valeur moyenne du LAI sur l'ensemble des parcelles échantillonnées ont pu être détectées.

Les méthodes classiques d'inversion n'étant pas applicables en cas d'images à très haute résolution spatiale, une nouvelle méthode adaptée à ces images a été développée. Cette méthode a donné des résultats positifs en utilisant des images *Ikonos* pour l'obtention de deux paramètres : le LAI et le taux de couverture arborée. Par contre, l'extraction de la concentration en chlorophylle des feuilles et l'indice structural N restent à valider en raison de l'absence de mesures terrain. Cependant, la faisabilité de la stricte inversion du modèle a été validée avec des tests de robustesse. Cette méthode, afin de pouvoir être employée de manière opérationnelle, doit être améliorée à plusieurs niveaux : automatisation et optimisation des processus de segmentation de l'image, classification des zones homogènes dans les images, etc.

La version du modèle DART que nous avons présentée peut déjà être considérée comme opérationnelle. Néanmoins, le modèle est susceptible de progresser dans plusieurs directions. Une des améliorations possibles serait la prise en compte de cellules mixtes, *i.e.* cellules qui incluent à la fois des éléments opaques et turbides. Ce nouveau type devrait améliorer la précision de la modélisation des plantes avec une

forte composante ligneuse. D'autre part, des travaux sont en cours pour élargir le domaine spectral du modèle DART jusqu'à l'infrarouge thermique, pour tout type de paysage (Boyat, 2001) et tout type d'atmosphère (Dallest, 2001).

Désormais, le modèle DART a atteint un stade de développement suffisant pour pouvoir être utilisé dans des domaines d'application. Ceci permet d'envisager une nouvelle étape pour ce modèle : le transfert de ce modèle à un industriel en vue de sa consolidation informatique et, par suite, de sa distribution. Cette exportation est actuellement en cours.

# ANNEXE A : Publications

Publications dans des revues à comité de lecture :

**Gascon F.**, Gastellu-Etchegorry J.P., Lefèvre M.J., 2001, « Radiative Transfer Model for Simulating High-Resolution Satellite Images », septembre, IEEE TGARS

Pinty B., Gobron N., Widlowski J.L., Gerstl S.A.W., Verstraete M.M., Antunes M., Bacour C., **Gascon F.**, Gastellu J.P., Goel N. Jacquemoud S., North P., Qin W., Thompson R., 2001, « The Radiative Transfer Model Intercomparaison Exercice », Journal of Geophysical Research, Vol. 106. No. D11, June 16.

Gastellu-Etchegorry J.P., **Gascon F.**, Estève, P., 2001, An interpolation procedure for generalizing a look-up table inversion method, (soumise à Remote Sensing of Environment).

Autres publications et communications :

**Gascon, F.**, Gastellu-Etchegorry, J.-P., et Lefèvre, M.-J., 1999, Simulation d'Images Satellitales à Très Haute Résolution, Actes du Séminaire "Télédétection à très haute résolution et analyse d'image", Cemagref, Montpellier.

**Gascon F.** , Gastellu-Etchegorry J.P., 2001, « Extraction of forest bio-physical variables using very high resolution imagery », Symposium International : Mesures Physiques et Signatures en Télédétection, Aussois, France

Gastellu-Etchegorry J.P., **Gascon F.**, Demarez V., Lefèvre M.J., Guillevic P., Benech N., Mathiaud V. , 2001, « DART : a 3-D model of satellite images and surface radiation budget », Symposium International : Mesures Physiques et Signatures en Télédétection, Aussois, France.

# ANNEXE B : Modèles de transfert radiatif

## B.1 DART version 1996

La version de 1996 du modèle DART (Gastellu-Etchegorry *et al.*, 1996) utilise les mêmes principes (méthodes des ordonnées discrètes, suivi de rayons, discrétisation en cellules parallélépipédiques, etc.) que la version présentée dans cette thèse. Les principales différences par rapport à la version actuelle sont :

- Simulation des paysages naturels avec quatre types d'éléments : sol, herbe, arbres et surfaces d'eau. Ainsi, ce modèle a uniquement cinq types de cellules (*Houppier*, *Tronc*, *Herbe*, *Sol* et *Eau*) (*Figure B.1*).

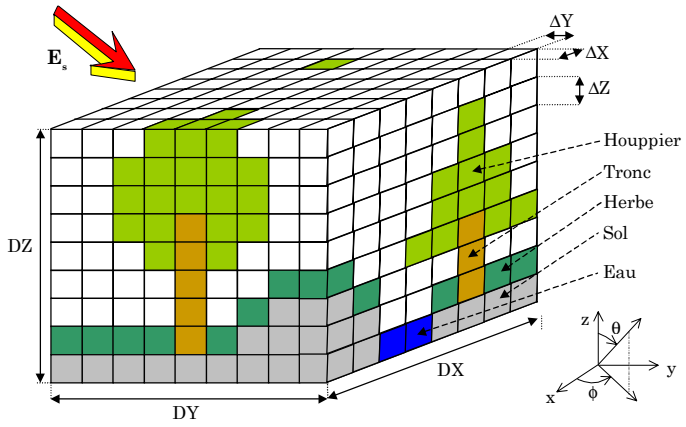



*Figure B.1 : Représentation tridimensionnelle d'une maquette DART.*

- Les troncs étaient considérés comme des milieux semi-opaques pour lesquels une fraction du rayonnement traverse la cellule et une autre est diffusée lambertiennement depuis les faces de la cellule.
- Pour les cellules opaques les interactions onde-matière ne surviennent qu'au niveau des faces de la cellule. La diffusion de l'énergie était faite à partir du centre des faces des cellules.
- Le modèle n'inclut pas la simulation de l'atmosphère. La simulation d'images acquises par un capteur était faite en couplant DART avec le modèle atmosphérique 6S (Pinel, 1997 ; Gascon *et al.*, 2001).
- Le traitement des cellules de feuillage était fait avec un certain nombre d'hypothèses (cf. § II.1) qui ont été reformulées dans cette thèse.

## B.2 6S

Le modèle 6S (Vermote *et al.*, 1997) permet de simuler le signal observé par un capteur spatial ou aéroporté d'une cible plane à une certaine altitude. Le domaine simulé correspond au rayonnement avec une longueur d'onde entre 0.25 µm et 4 µm. Le modèle prend en compte les phénomènes d'absorption par les gaz (vapeur d'eau, ozone, oxygène, etc.) et diffusion par les particules et les molécules.

Le modèle considère l'atmosphère comme une superposition de couches horizontalement homogènes sur un sol plat. Le paysage terrestre est considéré comme une cible circulaire plane, dont on connaît la réflectance, entourée d'un environnement de réflectance différente. Dans cette configuration la réflectance est obligatoirement lambertienne. Par contre, quand la cible et l'environnement sont homogènes, le modèle peut prendre en compte des réflectances anisotropes.

La réflectance de la cible observée par le capteur est donnée par :

$$\rho^*(\theta_s,\theta_v,\Delta\varphi_{sv}) = [\ \rho_a(\theta_s,\theta_v,\Delta\varphi_{sv}) + \rho^*_c(\theta_s,\theta_v,\Delta\varphi_{sv}) + \rho^*_e(\theta_s,\theta_v,\Delta\varphi_{sv})\ ].T_{gaz}(\theta_s,\theta_v) =$$

**Error!** (B.1)

Avec :

$\rho^*(\theta_s,\theta_v,\psi_{sv})$ Le facteur de réflectance apparente de la surface observée par le capteur.

$\mu_s$ , $\mu_v$ Les cosinus des angles zénithaux d'éclairement $\theta_s$ et d'observation $\theta_v$ .

$\Delta\varphi_{sv}$ L'angle azimuthal relatif entre les directions d'éclairement et d'observation.

$\rho_a(\theta_s,\theta_v,\psi_{sv})$ La réflectance intrinsèque de l'atmosphère.

$\rho^*_c(\theta_s,\theta_v,\Delta\varphi_{sv})$ Le facteur de réflectance apparente "total-direct". , i.e. rayonnement provenant de la cible sans interception pendant le trajet montant.

$\rho^*_e(\theta_s,\theta_v,\Delta\varphi_{sv})$ Le facteur de réflectance apparente "total-direct", lié à l'environnement.

$\rho_c$ $<\rho_e>$ Réflectance de la cible et réflectance moyenne de l'environnement.

$\frac{T(\theta_s)}{1-<\rho_e>.s_{ATM}}$ La transmittance totale (directe et diffuse) selon la direction incidente (soleil vers surface). Les interactions successives entre le sol et l'atmosphère sont prises en compte par le facteur $1/(1-<\rho_e>.s_{ATM})$, où $s_{ATM}$ représente l'albédo sphérique de l'atmosphère, c'est à dire le coefficient de rétrodiffusion atmosphérique sous éclairement diffus (isotrope).

$e^{-\tau/\mu_v}$ , $t_d(\theta_v)$ Les transmittances atmosphériques directe et diffuse, selon la direction d'observation (surface vers capteur). $\tau$ est l'épaisseur optique de

l'atmosphère à la verticale, l'absorption par les gaz n'étant pas prise en compte dans ce terme.

$T_{gaz}(\theta_s,\theta_v)$ La transmittivité totale des gaz atmosphériques selon les directions d'éclairement (soleil vers surface) et d'observation (surface vers capteur).

Les principales contraintes proviennent des configurations angulaires solaire et d'observation qui sont limitées à des angles zénithaux respectivement inférieurs à 60° et 50° et de la visibilité qui doit être supérieure à 5 km.

## B.3 6S+DART

La simulation des images au niveau du capteur est réalisée en effectuant un couplage simple entre le modèle DART et le modèle atmosphérique 6S (Vermote *et al.*, 1997). Le modèle DART est utilisé pour calculer le facteur de réflectance directionnelle $\rho_c(\theta_s,\theta_v,\Delta\varphi_{sv})$ et la réflectance moyenne de l'environnement $<\rho_e>$. Avec ces deux paramètres donnés par DART et ceux de l'atmosphère donnés par 6S ($\tau$, $s_{ATM}$, $T_{gaz}(\theta_s,\theta_v)$, $T(\theta_s)$, $\rho_a(\theta_s,\theta_v,\psi_{sv})$ , $e^{-\tau/\mu_v}$ et $t_d(\theta_v)$ ) nous pouvons résoudre l'équation (B.1) et déterminer la réflectance au niveau du capteur ($\rho^*(\theta_s,\theta_v,\psi_{sv})$ ).

## B.4 AMARTIS Monte Carlo

Le modèle de transfert radiatif AMARTIS (Miesch, 1999) permet de simuler les observations spatiales ou aéroportées d'un paysage terrestre défini par une surface opaque avec relief.

Le modèle considère une atmosphère plane, découpée en couches horizontales et homogènes. Chacune d'entre elles est caractérisée par les coefficients d'extinction, d'absorption et de diffusion des molécules et des aérosols.
La scène est représentée par un modèle numérique de terrain associé à une carte de modèles de réflectance bidirectionnelle, caractérisant le comportement de chaque pixel du MNT.

Le modèle emploie la méthode de Monte Carlo (*Figure B.2*). Un photon est lancé en haut de l'atmosphère et son trajet est simulé statistiquement entre l'atmosphère et le sol. Le trajet d'un photon ainsi lancé prend fin lorsqu'il est soit absorbé, soit sorti de l'atmosphère, cette méthode permet de comptabiliser les impacts au sol au fur et à mesure des lancers, puis ceux atteignant le capteur radiométrique.

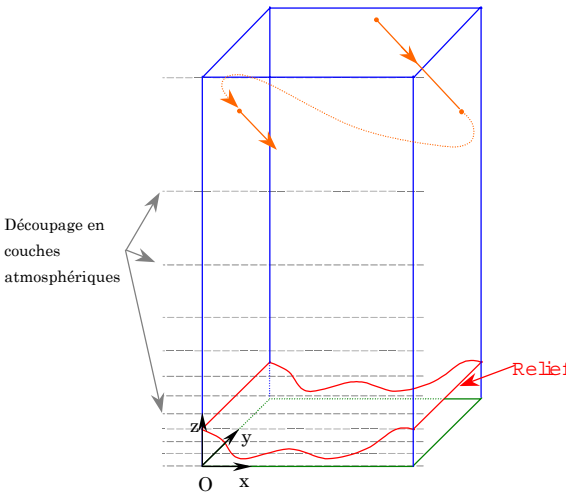



*Figure B.2 : représentation schématique du système paysage-atmosphère.*

## B.5 AMARTIS

Le modèle AMARTIS Monte Carlo, même complet et précis, est trop exigeant en termes de temps de calcul. C'est pourquoi le modèle a été modifié tout en optimisant les temps de calcul associés à chaque composante de la luminance reçue par le capteur. Ainsi, le modèle calcule séparément, avec des approches analytiques, les différents termes de l'éclairement au sol et de luminances en entrée du capteur (cf. § III.2.6). La seule composante qui n'est pas calculée ainsi est l'éclairement dû à la rétrodiffusion atmosphérique. En effet, pour cette composante le calcul a dû être fait avec une résolution Monte Carlo spécifiquement adapté.

## B.6 MODTRAN

Le modèle MODTRAN (Berk *et al.*, 1989) est reconnu comme une référence pour le calcul de la transmittance et luminance à une résolution spectrale moyenne (2 $cm^{-1}$ pour l'ultraviolet, visible et proche-infrarouge ; 20 $cm^{-1}$ pour le moyen-infrarouge et infrarouge thermique). Le modèle MODTRAN calcule quatre résultats pour un chemin atmosphérique :

- La transmittance atmosphérique
- La luminance atmosphérique (due à l'émission thermique et la diffusion)
- La diffusion du rayonnement solaire et lunaire sur un chemin.
- L'éclairement solaire reçu par un observateur.

Le modèle considère une atmosphère composé d'un empilement de couches horizontalement homogènes et situées sur un sol plat.

MODTRAN inclut plusieurs configurations standard de l'atmosphère, des aérosols (brouillard, poussière, cirrus et nuages d'eau). Les chemins simulés peuvent être définis souplement entre le niveau de la mer jusqu'à l'espace. Les propriétés absorbantes des molécules sont définies par l'atlas de paramètres spectroscopiques HITRAN (Hitran, 2001)). Ce modèle prend en compte la réfraction et la rotondité de la Terre dans le calcul des trajets atmosphériques ou le calcul de la masse d'air (important quand l'angle zénithal est supérieur à 80 degrés).

Ce modèle présente des différences par rapport à 6S pour les longueurs d'onde autour de 3.1 µm puisque 6S ne prend pas en compte le continuum de $N_2O$. Cependant, cet intervalle est déjà contaminé par la vapeur d'eau et n'est pas une fenêtre atmosphérique intéressante, ce qui l'exclut des bandes intéressantes pour la télédétection.

Une évolution de MODTRAN, appelée MOSART (Cornette *et al.*, 1994), rajoute la prise en compte du relief. Ce modèle permet de simuler le sol comme une surface opaque spécifiée par un MNT.

# ANNEXE C : Format de fichiers du modèle DART

## C.1 Format du fichier *saisie.bat*

Le format de chaque ligne du fichier est un commentaire entre astérisques suivi d'un ou plusieurs paramètres séparés par des espaces. Nous présentons ici un exemple complet de fichier batch avec des commentaires entre parenthèses. Les valeurs des paramètres incluses dans le fichier batch sont données à titre d'exemple.

```
('PARAMETRES GENERAUX')
*Batch file's name of 'Saisie' program                    * saisie.bat
*Batch file's name of 'Maket' program                     * maket.bat
*Batch file's name of 'Phase' program                     * phase.bat
*Batch file's name of 'Dart' program                      * rt_dart.bat
*Scene model characteristic                              * 1
(
        1 – Arbres définis par une position et des dimensions exactes
        2 – Arbres définis par une position exacte et un position aléatoire
        3 – Arbres définis par des dimensions et une position aléatoires
)
*Cell dimensions     (x,y,z)                             * 1.0   1.0   1.0
*Scene dimensions    (X,Y)                               * 50.0   50.0
*Checking file's name                                    * control.con
*Scene model file's name                                 * scene.mak
*Propagation direction file's name                       * directions.dir
*Solar configuration: 90<SZA(°)<180,0<SAA(°)<360         * 150.0   0.0                    (θs,φs)
*Specular Effects          Yes (1),No (0)                * 0
('DEFINITION DU SOL')
*Type of soil reflectance                                * 1
(
        0 – FRD lambertienne avec réflecance constante
        1 – FRD lambertienne avec réflectance variable
        2 – FRD lambertienne + composante spéculaire
        3 – Modèle de FRD de Hapke + composante spéculaire
        4 – FRD pré-calculée
)
(si Type of soil reflectance différent de 4)
        *Topography              Yes(1),No (0)           * 0/1
        (cas Topography =1)
                *Topography file name                            * hills.mnt
                *Encoding height min and max values              * 0  100
(cas Type of soil reflectance = 0)
        *Soil lambertian reflectance                     * 0.12
(cas Type of soil reflectance = 1)
        *Soil lambertian reflectance                     * 0.12
        *Standard Deviation on Soil Reflectance          * 0.01
(cas Type of soil reflectance = 2)
        *Soil lambertian specular function indice        * 0      (dans le fichier coeff_scat.src)
(cas Type of soil reflectance = 3)
        *Soil lambertian specular function indice        * 0      (dans le fichier coeff_scat.src)
(cas Type of soil reflectance = 4)
        *Phase function name lamb+spec                   * 0      (dans le fichier coeff_scat.src)
```

```
(DEFINITION DES SURFACES D'EAU)
*Kind of Water Surfaces                                  * 1
        (
                0 –  Pas de surfaces d'eau
                1 – Lacs uniquement
                2 – Rivières uniquement
                3 – Rivières et lacs
        )
(cas Kind of Water Surfaces = 1 ou 3)
        *Number of Lakes (lake=ellipse)                  * 1
        ( pour chaque lac)
                *Coordinates of lake center X,Y                  * 10.0   10.0
                *Lake dimensions : Length of 1/2 axis X,Y        * 10.0   14.0
                *Type of optical properties and reflectance or index  * 0   0.03
(cas Kind of Water Surfaces = 2 ou 3)
        *Number of rivers                                * 1
        (pour chaque rivière)
                *Number of points defining the river             * 2
                (pour chaque point)
                        *Point n 1 (x y)                                 * 10.0   10.0
                *River width                             * 5
                *Type of optical properties and reflectance/index * 0   0.03
*Lakes priority on vegetation cells             * 1
(
   1 - Toute végétation
   2 -  Pas de priorité sur les cellules de végétation
   2 - Uniquement les cellules de végétation du sous-bois
   3 – Uniquement les cellules tronc
)

(DEFINITION DU SOUS-BOIS)
*Understory :                                   * 1                  (oui=1/non=0)
(cas Understory = 1)
*Mean Height and Standart Deviation             * 0.5   0.0
*LAI value                                      * 2.0
*Phase Function's name                          * grass
*Phase Function's index                         * 1              (dans le fichier coeff_scat.src)

(DEFINITION DES ARBRES)
*Trees                                          * 1              (oui=1 / non=0)
(si Scene model characteristic = 1)
        *Number of Species                               * 1
        *Scene parameters file's name                    * trees.txt
        *Zone where LAI was sampled  whole(0) sub(1)     * 0/1
        (cas 1)
                *Upper left corner (x,y)                         * 1.0  1.0
                *Lower right corner (x,y)                        * 20.0  20.0
        *Zone for DART simulations  whole(0) sub(1)      * 0/1
        (cas 1)
                *Upper left corner (x,y)                         * 1.0  1.0
                *Lower right corner (x,y)                        * 20.0  20.0
        *Number of Trees in the whole scene              * 5
        *Number of Species                               * 1
        (pour chaque espèce)
                *LAI distribution in tree crowns (Nb levels)     * 3
                (si nb levels >0)
                        *% of empty leaf cells at each level             * 0.8 0.6 0.4
```

*LAI * 4.0
*Phase Function's name * leafs
*Phase Function's indice * 1
*Trunk Reflectance * 0.09
*Trunk Diameter for priority over leaf cells * 0.01

***(si Scene model characteristic = 2)***

*Number of differrent trees species * 1
*Location trees file (0=exists/1=to be created) * 0
*Name of the file that stores the location of the trees * position.inf
*Standard deviation of mean tree location * 0.01
*Zone where LAI was sampled whole(0) sub(1) * 0/1

***(cas 1)***

*Upper left corner (x,y) * 1.0 1.0
*Lower right corner (x,y) * 20.0 20.0

*Zone for DART simulations whole(0) sub(1) * 0/1

***(cas 1)***

*Upper left corner (x,y) * 1.0 1.0
*Lower right corner (x,y) * 20.0 20.0

***(pour chaque espèce d'arbre)***

*Number of Trees in the whole scene * 5
*Total trunk mean and standard deviation * 5.0 0.3
*Mean trunk height and s.d. * 5.0 0.2
*Mean trunk diameter and s.d. * 0.2 0.05
*Trunk height and min diameter in canopy * 1 0.1
*Trunk reflectance * 0.11
*Crown shape (0..3) *0
*Canopy height and s.d. * 6.0 0.5

***(cas crown shape = 0 ellipsoïde)***

*First axis of horizontal ellipse (A) and s.d. * 5.0 0.1
*Second axis of horizontal ellipse (B) and s.d. * 5.0 0.1

***(cas crown shape = 1 ellipsoïde composé)***

*First axis of horizontal ellipse (A) and s.d. * 5.0 0.1
*Second axis of horizontal ellipse (B) and s.d. * 5.0 0.1
*Half height of lower ellipsoïd(C) and s.d. * 2.0 0.1

***(cas crown shape = 2 truncated cone )***

*Radius of the base of the cone (A) and s.d. * 6.0 0.1
*Radius of the top of the cone (B) and s.d. * 1.0 0.05

***(cas crown shape = 3 trapezoid)***

*Length of the base (A) and s.d. * 6.0 0.1
*Width of the base (B)and s.d. * 4.0 0.1
*Length at the top (C) and s.d. * 2.0 0.05
*Width at the top (D) and s.d. * 1.5 0.05

*LAI * 6
*Trunk diameter for priority over leaf cells * 0.5

***(si Scene model characteristic = 3)***

*Number of species * 1
*Number of trees (sp1) in the whole scene * 5
*Spatial distribution of trees (0,1 or 2) * 0

***(cas Spatial distribution of trees = 0)***

*Probability of the trees at the nodes of the trees * 0.9

***(cas***
***(cas***

*Mean trunk height and s.d. * 5.0 0.2
*Trunk height and min diameter in canopy * 1 0.1
*Mean trunk diameter and s.d. * 0.2 0.05
*Trunk reflectance * 0.11
*Crown shape (0..3) *0

*Canopy height and s.d. * 6.0 0.5
***(cas crown shape = 0 ellipsoï de)***
*First axis of horizontal ellipse and s.d. * 5.0 0.1
*Second axis of horizontal ellipse and s.d. * 5.0 0.1
***(cas crown shape = 1 ellipsoï de composé)***
*First axis of horizontal ellipse and s.d. * 5.0 0.1
*Second axis of horizontal ellipse and s.d. * 5.0 0.1
*Half height of lower ellipsoï dand s.d. * 2.0 0.1
***(cas crown shape = 2 truncated cone )***
*Radius of the base of the cone and s.d. * 6.0 0.1
*Radius of the top of the cone and s.d. * 1.0 0.05
***(cas crown shape = 3 trapezoid)***
*Length of the base and s.d. * 6.0 0.1
*Width of the base and s.d. * 4.0 0.1
*Length at the top and s.d. * 2.0 0.05
*Width at the top and s.d. * 1.5 0.05

*LAI distribution in tree crowns (nb levels) * 3
***(si nb levels >0)***
*% of empty leaf cells at each level * 0.8 0.6 0.4
*LAI * 6
***(pour chaque espèce d'arbre)***
*Phase function name * leafs
*Phase function indice * 1
*Dimensions dx and dy of the grid * 15 15
*Standard deviation on tree position * 1.2
*Trunk diameter for priority over leaf cells * 0.5

*Spectral domain VIS(0), TIR(1), VIS+TIR(2) * 0
*Normal(0), Discrete Illumination(1), Fluo(2) * 0
*Gauss Siedel accelerating technique (0,1) * 1

***(SORTIES DU MODELE)***
*Reflectance products * 1
*BRF product * 1
*Image float Yes(1), No(0) * 1
*Image byte Yes(1), No(0) * 0
*Extrapolation Yes(1), No(0) * 0
*All iterations images Yes(1), No(0) * 0
*Maximal theta of the images * 30.000000
*Scattering+Intercepted+Incident matrices Yes(1), No(0) * 0
*Leaf scattering images * 0
*3-D scattering outfile Yes(1), No(0) * 0
*Radiative budget products * 1
* fR and fAR profiles Yes(1), No(0) * 1
*3D fR and fAR matrices Yes(1), No(0) * 1
*Scattering+Intercepted+Incident matrices Yes(1), No(0) * 0
*LAI products * 1
*LAI profile Yes(1), No(0) * 1
*LAI 3D matrix Yes(1), No(0) * 1
*BRF component * 0
***(***
***cas BRF component :***
***0 – FRD totale***
***1 – FRD direct-direct***
***2 – FRD direct-total***
***3 – FRDdiffus-direct***
***4 – FRD diffus-total***

```
        5 – FRD atmosphérique
)
*Value of threshold for light propagation T2          * 0.001
*Value of threshold for albedo T3                              * 0.001
*Number of iteration                                  * 4
(DEFINITION DE L'ATMOSPHERE)
*Atmosphere              [0,1,2,3]                    * 3
(cas Atmosphere = 1   Illumination isotrope)
        *SKYL                                                  * 0.17
(cas Atmosphere =2  Illumination anisotrope par fichier)
        *Illumination file name                                * illumination.txt
( cas Atmosphere = 3  Simulation du transfert radiatif atmosphérique)
        *Atmosphere parameters file's name                     * atmosphere.src

(DEFINITION DU MUR AUTOUR DE LA SCENE)
*Walls in the scene                                   * 4
*Height of the wall x=0                               * 10.0
*Height of the wall x=xmax                            * 10.0
*Height of the wall y=0                               * 10.0
*Height of the wall y=ymax                            * 10.0
*Reflectance of the wall                              * 0.015

(DEFINITION DES ZONES URBAINES)
*Kind of Urban Areas                                  * 4

(RADIOMETRIC SENSOR SIMULATION)
*Simulation of radiometric sensor                     * 1              (oui=1/non=0)
(cas Simulation of radiometric sensor)
*Impulsional response file and dimension   * ir.txt  5
*Parameters A1 and S0                      * 0.1  0.1
```

## C.2 Format du fichier *atmosphere.src*

Le format de chaque ligne du fichier est un commentaire entre astérisques suivi d'un ou plusieurs paramètres séparés par des espaces. Nous présentons ici un exemple complet de fichier *batch* avec des commentaires entre parenthèses. Les valeurs des paramètres incluses dans le fichier *batch* sont données à titre d'exemple. Les types d'atmosphère sont définis dans le *Chapitre III* de la thèse.

```
* Already/Not yet processed by phase  * 0/1
* Without/with database               * 0/1
(si without/with database = 1)
        * Database file name                    * database10.txt
        * Spectral sampling                     * 2.0 2.0
        * Type of model atmosphere [0 7]        * 7
        (si Type of model atmosphere = 7)
                * Scale Factor model[0 6] - Ozon model[0 6] - Temperatures model[0 6] - Water
                Vapor model[0 7]                * 1 1 1 7
                (si Vapor model = 7)
```

* Precipitable water amount (cm) * 1.4
* Aerosol lodel [0 x] * 1

***(si without/with database = 0)***

* Solar Illumination(W.m-2.um-1) * 2000
* Aerosols Scale Factor * 2000
* Aerosols Optical Depth * 0.202
* Aerosols albedo * 0.947
* g1 [0 1] * 0.790
* g2 [0 1] * 0.4
* a [0 1] * 0.95
* Gas Optical Depth * 0.049
* Gas Scale Factor * 8000
* Gaseous Transmittance * 0.750

***(//partie completee par phase.c (si data=1)//)***

***(si without/with database = 1)***

* Solar Illumination(W.m-2.um-1) * 2000
* Aerosols Scale Factor * 2000
* Aerosols Optical Depth * 0.202
* Aerosols albedo * 0.947
* g1 [0 1] * 0.790
* g2 [0 1] * 0.4
* a [0 1] * 0.95
* Gas Optical Depth (diffusion) * 0.049
* Gas Scale Factor (diffusion) * 8454.9
* H20 Scale factor * 2402.5
* CO2 Scale factor * 8467.9
* CO Scale factor * 6243.7
* CH4 Scale factor * 8192.5
* N2O Scale factor * 8108.9
* O2 Scale factor * 8449.5
* N2 Scale factor * 4639.6
* CO2 Transmittance (absorbtion) * 0.3354
* CO Transmittance (absorbtion) * 1.0
* CH4 Transmittance (absorbtion) * 1.0
* N2O Transmittance (absorbtion) * 0.9998
* O2 Transmittance (absorbtion) * 1.0
* N2 Transmittance (absorbtion) * 1.0
* O3 Transmittance (absorbtion) * 1.0
* H2O Transmittance (absorbtion) * 0.8517
* Ozon distribution (nb layers) * 32

0 0.006558
1 0.006558
***(…)***

* Temperatures distribution * 33

0 288.2
1 281.7
***(…)***

## C.3 Format des fichiers *trees.inf*

Chaque ligne du tableau correspond au format d'une ligne du fichier *trees.inf* en fonction du type de houppier.

| Cas | Espèce | X | Y | HMT | HMTC | DMT | DMTC | Type Houppier | HMC | A | B | C | D |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ellipse | | | | | < 0 | | | 0 | | | | | |
| | | | | | >0 | | | | | | | | |
| Ellipse composée | | | | | < 0 | | | 1 | | | | | |
| | | | | | >0 | | | | | | | | |
| Cône | | | | | < 0 | | | 2 | | | | | |
| | | | | | >0 | | | | | | | | |
| Trapèze | | | | | < 0 | | | 3 | | | | | |
| | | | | | >0 | | | | | | | | |
| Cône composé | | | | | < 0 | | | 5 | | | | | |
| | | | | | >0 | | | | | | | | |

- HMT: Hauteur moyenne du tronc.
- HMTC: Hauteur moyenne du tronc dans le houppier.
- DMT : Diamètre moyen du tronc .
- DMTC : Diamètre moyen du tronc dans le houppier.
- HMC: Hauteur moyenne du houppier.

Pour les valeurs des paramètres A, B, C et D voir le format décrit dans le fichier saisie.bat pour la génération aléatoire de forêts.

## C.4 Format de la base de données atmosphérique

Le texte contenu dans le fichier est toujours écrit entre astérisques (*texte*).

L'emplacement des valeurs est entre crochets (<nom_variable>).

***FORMAT DE LA BASE DE DONNEES***
*Nb de modèles atmo prédéfinis (manual inclus)* <nb_models>
*Nb de modèles aérosols* <nb_models_aer>
*Nb d'altitudes descriptives de l'ozone* <nbli_ozon>
*Nb d'altitudes descriptives de la Température* <nbli_temp>
*Nb de fréquences pour la transmittance* <nbli_Tg>
*Nb de qtés d'eau précipitables (répart USSTD)* <nbcol_H2O>

***SPECTRAL SAMPLING***
*Freq max* <nu_max> *Lg d'onde min* <lambda_min>
*Freq min* <nu_min> *Lg d'onde max* <lambda_max>
*pas de fréquence* <freq_incr>

***AEROSOLS PARAMETERS :***
**  *manual*  *Rural V=23*  *Rural V=5*  *Maritime V=23*  *Urban V=5* ...
*H_p*  <H_p_0>  <H_p_1>  ...
*g1_p*  <g1_p_0>  <g1_p_1>  ...
*g2_p*  <g2_p_2>
*a_p*

***UNIFORMLY MIXED GASES PARAMETERS(=! O3):***
<alpha>  <beta>  *(tau_diff_m=alpha*lambda^(-beta))*
**  *manual*  *USSTD*  *Tropical*  ...  *SubArcWin*
*H2O*  <H_H2O_0>  <H_H2O_1>  <H_H2O_2>  ...  <H_H2O_6>
*CO2*  <H_CO2_0>  ...
*CO*  ...
*CH4*  ...
*N2O*
*O2*
*N2*
*diffusion*

***OZONE REPARTITION*** *tableau(z1,z2,modèle) contenant la fraction d'ozone par couche*
*z1(km)*  *z2(km)*  *manual*  *US_STD*  ...  *SubArcWin*
0.000  1.000  <xO3[0][0]>  <xO3[0][1]>  ...  <xO3[0][6]>
1.000  2.000  <xO3[1][0]>  ...
...
70.000  100.000  ...

***TEMPERATURE REPARTITION*** *tableau(z,modèle)*
*z(km)*  *manual*  *USSTD*  ...  *SubArcWin*
*0*  <T[0][0]>  <T[0][1]>  ...  <T[0][6]>
*1*  <T[1][0]>  ...
...
*100*  ...

## C.5 Format du fichier urban.*src*

Nous présentons ici un exemple complet de fichier *batch* avec des commentaires entre parenthèses.

Type fichier
***(***
    ***0- Bâtiments, routes et murs***
    ***1- Bâtiments uniquement***
    ***2- Routes uniquement***
    ***3- Murets uniquement***
    ***4- Pas de zone urbaine***
***)***
nb bâtiments  nb maisons
***(pour chaque bâtiment)***
    altitude des murs
    nb. maisons
    ***(pour chaque maison)***
        coordonnées (x,y,z) du point M1

coordonnées (x,y,z) du point M2
coordonnées (x,y,z) du point M3
coordonnées (x,y,z) du point M4
type de toiture
***(***
***0 – Pas de toiture***
***1 – Toiture classique***
***2 – Toiture plane***
***3 – Toiture complèxe***
***)***
***(cas toiture = 1)***
coordonnées (x,y,z) du point T1
coordonnées (x,y,z) du point T2
***(cas toiture = 2)***
hauteur du toit
coordonnées (x,y,z) du point T1
coordonnées (x,y,z) du point T2
coordonnées (x,y,z) du point T3
coordonnées (x,y,z) du point T4
***(cas toiture = 3)***
coordonnées (x,y,z) du point T1
coordonnées (x,y,z) du point T2
coordonnées (x,y,z) du point T3
coordonnées (x,y,z) du point T4
numéro de fonction de phase et réflectance mur1
numéro de fonction de phase et réflectance face_toit1
numéro de fonction de phase et réflectance mur2
***(si toiture différent de 0)***
numéro de fonction de phase et réflectance face_toit2
numéro de fonction de phase et réflectance mur3
***(si toiture différent de 0)***
numéro de fonction de phase et réflectance face_toit3
numéro de fonction de phase et réflectance mur4
***(si toiture différent de 0)***
numéro de fonction de phase et réflectance face_toit4
***(si toiture = 2 ou 3)***
numéro de fonction de phase et réflectance face_toit5

nombre de routes
***(pour chaque route)***
nombre de points
***(pour chaque point)***
coordonnées du point RN
largeur de la route
numéro de fonction de phase et réflectance point1

nombre de murets
***(pour chaque muret)***
coordonnées du point M1
coordonnées du point M2
coordonnées du point M3
coordonnées du point M4
hauteur du muret
numéro de fonction de phase et réflectance muret

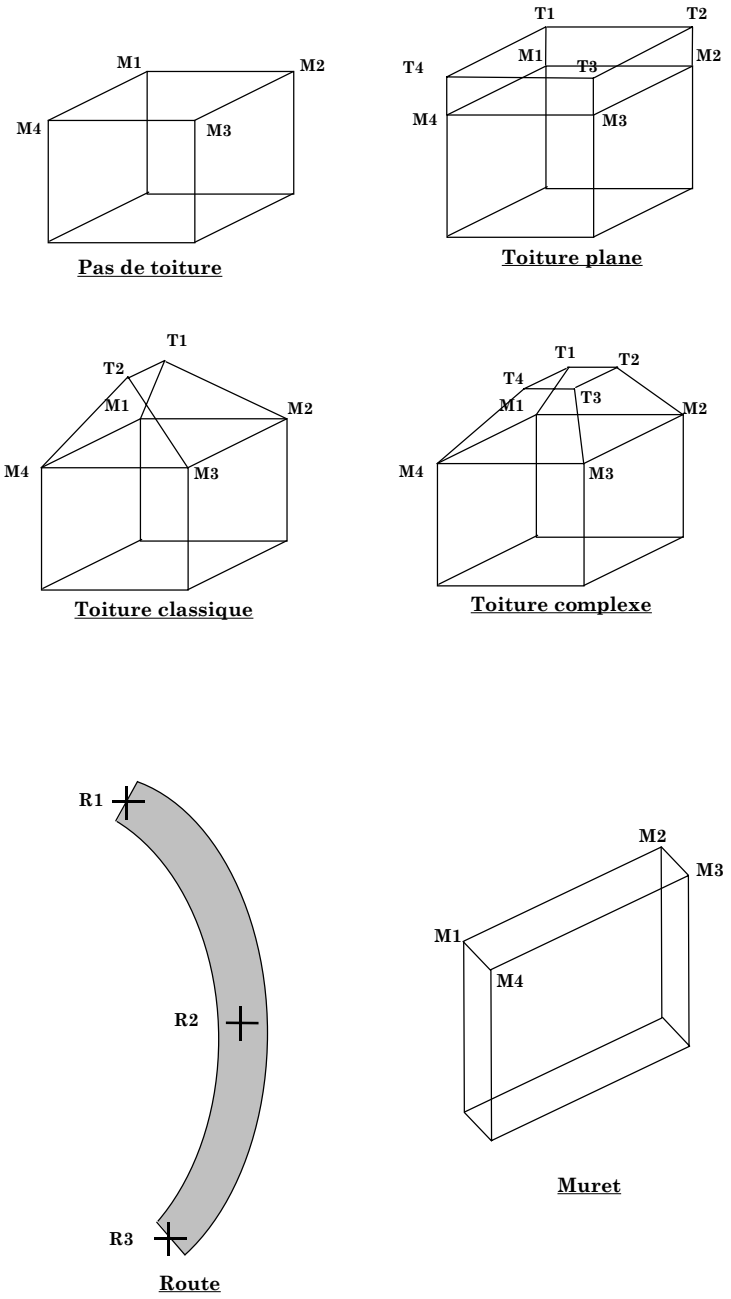



*Figure C.1 :* Schémas des principaux paramètres des maisons, de la route et du muret.

# RÉFÉRENCES

Asrar, G. et Dozier J., 1994, EOS – Science Strategy for the Earth Observing System, Woodbury, New York : AIP Press.

ASTER, 2001, Base de données optiques, NASA/JPL, (http://speclib.jpg.nasa.gov).

Baret, F., et Guyot, G. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and PAR assessments. Remote Sens. of Environ. 35 :161-173.

Baudoin A., 1999, The current and future SPOT Program , Workshop of ISPRS Working Groups I/1, I/3 and IV/4: Sensors and Mapping from Space –Hanover.

Benech, N., 2000, Modélisation des zones urbaines et forestières, simulation d'images haute résolution, dans le cadre du développement du logiciel DART, Stage DESS Informatique Multimédia, Université Bordeaux I.

Berk, A., Bernstein, L.S., et Robertson, D.C., 1989, MODTRAN : A Moderate Resolution Model for LOWTRAN 7, GL-TR-89-0122, Geophys. Lab., Bedford, MA, USA 38pp.

Boyat, P., 2001, Modélisation du transfert radiatif dans le domaine thermique des surfaces terrestres. Rapport de projet fin d'études. École Nationale Supérieure des Constructions Aéronautiques (Toulouse, France).

Brakke, T., Smith, J., et Harnden, J., 1989, Bidirectional scattering of light from tree leaves, Remote Sensing of Environment, 29 : 175-183.

Breece, H.T., III, Holmes, R.A., 1971, Bidirectional scattering characteristics of healthy green soybean and corn leaves in vivo. Applied Optics, 10 :119-127.

Colas, H., 1998, DART Monte Carlo, Stage Fin d'Études de l'École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et l'Espace, Toulouse, France.

Cornette, W. M., Acharya, P. K., Robertson, D. C., et Anderson, G. P., 1994, Moderate spectral atmospheric radiance and transmittance code (MOSART). Rep. R-057-94(11-30), La Jolla, CA: Photon Research Assocoates, Inc.

Curtis, A.R., 1956, The computation of radiative heating rates in the atmosphere, Proc. Roy. Soc. London, A236, p. 156-159.

Dallest, T., 2001, Modélisation du transfert radiatif optique dans le domaine de l'infrarouge optique. Rapport de projet fin d'études. École Nationale Supérieure d'Hydraulique et de Mécanique de Grenoble.

Decoster, N.. 2000A. Optimisation des gabarits spectraux des bandes XS du système 3S Contrat CNES/CESBIO/NOVELTIS Réf. NOV-HR-TN-00.001. Rapport final de la société Noveltis pour le CNES du 30 mars 2000.

Decoster, N.. 2000B. Etude du dimensionnement XS à l'aide du modèle DART. Contrat CNES/NOVELTIS Réf.. NOV-3037-NT-411. Rapport final de la société Noveltis pour le CNES du 30 août 2000.

Decoster, N.. 2000C. Optimisation des gabarits spectraux des bandes XS du système 3S-HR. Contrat CNES/NOVELTIS Réf. NOV-2000-BL-590. et Réf. NOV-HR-TN-00.006 Rapport final du 13 Novembre 2000. Rapports de la société Noveltis pour le CNES.

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 III, 142 p.

Ditteon, R., 1997, Modern Geometrical Optics, ISBN : 0-471-16922-6.

Ducrot, D., 2000, Analyse des données et Traitement d'images, cours de l'Université Paul Sabatier, Toulouse.

Dufrêne, E., Le Dantec, V., Demarez, V., Gastellu-Etchegorry, J.P., Marty, G., Mougin, E., Proisy, C., Lacaze, B., et Rambal, S., 1997, Remote sensing of the Fontainebleau forest during EMAC-94 : objectives and data collection program., Workshop Proceedings EMAC 94/95 Final Results, ESTEC, ESA.

Estève, F., 1999, Traitement d'Images et Simulation d'Observations Satellitaires, Rapport du projet fin d'études de l'École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Constructions Aéronautiques (Toulouse, France).

Estève, P., 1998, Inversion du modèle de transfert radiatif DART. Thèse, Université Paul Sabatier Toulouse III, 115pp.

Gastellu-Etchegorry, J.P., Demarez, V., Pinel, V. et Zagolski, F., 1996, Modeling Radiative Transfer in Heterogeneous 3-D Vegetation Canopies. Rem. Sens. Env., 58 :131-156.

Gastellu-Etchegorry, J.P., Guillevic P., Zagolski F., Demarez V., Trichon V., Deering D. et Leroy M., 1999, Modelling BRF and radiation regime of tropical and boreal forests, Part I : BRF, Remote Sensing of Environment, 68 :281-316.

Gex, H., 1999, Consolidation de l'intérêt de l'élargissement de P vers le BO ou le PIR pour l'observation des luminances situées dans les zones d'ombre, Projet fin d'études de l' École Nationale Supérieure des Sciences Appliquées et de Technologie (Lannion, France).

Goel, N.S., et Strebel, D.E., 1983, Inversion of vegetation canopy reflectance models for estimating agronomic variables, I. Problem definition and initial results using the Suits model, Remote Sensing of Environment, 13 :487-507.

Goody, R.M., 1964, Atmospheric Radiation 1, Theoretical Basis, Oxford University Press, 436 pp.

Govaerts, Y., et Verstraete, M. M., 1998, Raytran : A Monte Carlo ray tracing model to compute light scattering in three-dimensional heterogeneous media, IEEE Transcations on Geoscience and Remote Sensing, 36, 493-505.

Grant, L., 1987, Diffuse and specular characteristics of leaf reflectance. Remote Sensing of Environment, 22 :309-322.

Griersmith, D. C., 1991, Remote Sensing in Hydrological and Agrometeorological Applications: proceedings of the Fifth UN/FAO/WMO/ESA Training Course, COSSA Publication 026.

Hall, G.G., Townshend, J.R. et Engman, E.T., 1995, Status of remote sensing algorithms for estimation of land surface state parameters, Remote Sens. of Environ., 51 : 138-156

Hall, G.G., Townshend, J.R., et Engman, E.T., 1995, Status of remote sensing algorithms for estimation of land surface state parameters. Remote Sens. of Environ.. 51 :138-156.

Hapke, B., 1981, Bidirectional reflectance spectroscopy 1. Theory, Journal of Geophysical Research, Vol. 86, p.3039-3054.

Hapke, B., 1993, Theory of reflectance and emittance spectroscopy, Topics in remote sensing, Vol. 3, Cambridge University Press.

HITRAN, 2001, HIgh-resolution TRANsmission molecular absorption database, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, http://cfa-www.harvard.edu/ HITRAN/.

Hu B., Inannen, K. et Miller, J. R., 2000, Retrieval of Leaf Area Index and Canopy Closure from CASI Data over the BOREAS Flux Tower Sites. Remote Sensing of Environment 74 :255-274

Huete, A.R., 1998. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sens. of Envir. 25 :295-309.

Idso B., De Wit, C.T., 1970, Light relations in plant canopies, Applied Optics, Vol. 9, p.177-184.

ILWIS (Integrated Land and Water Information System),ITC-ILWIS Group, P.O. Box 6, 7500 AA Enschede, the Netherlands. (http://www.itc.nl/ilwis).

Jacquemoud, S., 1992, Utilisation de la haute résolution spectrale pour l'étude des couverts végétaux : développement d'un modèle de réflectance spectrale, Thèse, Université Paul Sabatier, 92p.

Jacquemoud, S., et Baret, F., 1990, PROSPECT : A model of leaf optical properties spectra, Rem. Sens. Env., 34 :75-91.

Khanna P.K., et Ulrich B.. 1991. Ecochemistry of temperate deciduous forests. In : Temperate Deciduous Forest. Ecosystems of the World. Röhrig E. and Ulrich B. (Eds), Vol 7, Elsevier : 121-163.

Kim, M.S., 1994. The use of narrow spectral bands for improving remote sensing estimation of fractionally absorbed photosynthetically active radiation (fAPAR). Master Thesis. Department of Geography, University of Maryland, College Park, MD. 67pp.

Kimes, D., Gastellu-Etchegorry, J.P., et Estève, P., 2000, Recovery of forest canopy characteristics through inversion of a complex 3D model, Remote Sens. of Environ (in press).

Kimes, D.S., et Kirchner, J.A., 1982, Radiative transfer model for heterogeneous 3-D scenes, Applied Optics, 21 :4119-4129.

Kimes, D.S., Knyazikhin, Y., Privette, J.L., Abuelgasim, A.A. et Gao F., 2000, Inversion Methods for Physically-Based Models, Remote Sensing Reviews, Vol. 18, pp. 381-439.

Kimes, D.S., Nelson, R.F., Manry, M.T., et Fung, 1998, Attributes of neural networks for extracting continuous vegetation variables from optical and radar measurements. Int. J. Remote Sens. 19 :2639-2663.

Kimes, D.S., Sellers, P.J. et Diner, D.J., 1987, Extraction of spectral hemispherical reflectance (albedo) of surfaces from nadir and directional reflectance data, Int. J. Rem. Sens., 8 : 1727

Kong, J. A., 1986, Electromagnetic Wave Theory, John Wiley & Sons, ISBN 0-471-82823-8

Kuusk, A., 1985, The hot spot effect of a uniform cover, Sovietic Journal of Remote Sensing, Vol.3, p.645-658.

Le Dantec, V., 1997, Utilisation de la télédétection multi-spectrale en vue de modéliser le bilan carboné d'un massif forestier. DEA Ecologie Générale et Production Végétale, Université de Paris-Sud XI, 35p.

Lefèvre-Fonollosa, M.-J.. 2001. Les Activités Thématique Système (ATS) en préparation au programme PLEIADES-HR. Note interne CNES (en cours de préparation).

Lefèvre-Fonollosa, M.J., Gex H., Miesch C., Gascon F.. 1999. ATS1:Comparaison des modèles DART/AMARTIS / 6S dans le cadre de l'étude des luminances des paysages dans les ombres (Toulouse, le 12 octobre 1999- note interne CNES).

Lelong, C., 1999, Caractérisation des surfaces agricoles et de leur évolution par reconnaissance hyperspectrale, Université Paul Sabatier, Toulouse, France.

Lenoble J., 1993, Atmospheric radiative transfer, Adarsh Deepak Publishing.

Liang, S., et Strahler, A. H., 1995 , An analytic radiative transfer model for a coupled atmosphere and leaf canopy, Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 100(D3), 5085-5094.

Malaret, E.R., 1982, The relationship of sensor parameters to applications data analysis, Master's Thesis, Purdue University.

Malkmus, W., 1967, Random Lorentz Band Model with Exponential-Tailed S-1 Line-intensity Distribution Function, J. Opt. Soc. Am. 57, 3, p. 323-329.

Mathiaud, V., 2000, Modélisation Physique d'Images de Télédétection –Paysages Naturels et Urbains, Projet fin d'études de l'École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace (Toulouse, France).

Mayer, B. et A. Kylling, 2001, Three-dimensional radiative transfer over inhomogeneous terrain, IAMAS 2001 assembly, Innsbruck, July 10 - July 18.

Miesch, C., 1999, Quantification des Effets de l'Hétérogénéité et du relief du sol en télédétection : modélisation du signal en entrée du capteur. Thèse de l'École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, Toulouse, France

Munoz, D., 2000, Influence de l'environnement pour la détection dans les zones à l'ombre, en vue d'une adaptation du gabarit du canal panchromatique des satellites PLEIADES, Stage fin de maîtrise en informatique de l'Université Paul Sabatier.

Myneni, R.B. et Ross, J., 1991, Photo-vegetation Interactions – Applications in Optical Remote Sensing and Plant Ecology, Springer-Verlag, ISBN 3-540-52108-9.

Myneni, R.B., Asrar, G., Kanemasu, E.T., 1989, The theory of photon transport in leaf canopies, Theory and applications of optical remote sensing, Asrar G. Eds, Wiley, New York, p. 167-265.

Nelder, J.A., et R. Mead, 1965, Computer Journal, 7 :308

Nicolini, E., 1997, Approche Morphologique du développement du hêtre (Fagus Sylvatica L.). Thèse Université Montpellier II, France. 173 pp.

Nilson T., 1968, On the optimum geometrical arrangement of foliage in the plant cover. In : Solar Radiation Regime in Plant Stand Acad Sci ESSR, Institute of Physics and Astronautics, Tartu, USSR, pp 112-146.

Nilson, T., 1991, Approximate analytical methods for calculating the reflection functions of leaf canopies in remote sensing applications, Photon-vegetation Interactions, R.B. Myneni and J. Ross Eds., p.161-190.

North, P. R. J., 1996, Three-dimensional forest light interaction model using a Monte Carlo method, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 34, 946-956.

Peraiah, A., 2001, Introduction to Radiative Transfer: Methods and Applications in Astrophysics, 464pp., ISBN: 0521770017, Publisher: Cambridge University Press.

Perret L.. 2000. - Le Développement Exploratoire CHAÎNE IMAGE HAUTE/TRES HAUTE RESOLUTION (HR/THR)" Toulouse, le 31 janvier 2000- Note interne CNES référence : 3S-PL-0-522-CNES

Pinel, V., 1997, Apport de la modélisation du transfert radiatif pour l'étude des écosystèmes forestiers par télédétection, Thèse de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 254 pp.

Pinty, B., Gobron, N., Widlowski, J.-L., Gerstl, S. A.W., Verstraete, M. M., Antunes, M., Bacour, C., Gascon, F., Gastellu-Etchegorry, J.-P., Jacquemoud, S., North, P., Qin, W., et Thompson, R., 2001, Radiation transfer model intercomparison (RAMI) exercise, Journal of Geophysical Research, Vol. 106, No. D11, pp. 11937-11956.

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.

Press, W.H., Teukolsky A.A., Vetterling W.T. et Flannery B.P., 1992, Numerical recipes in C – The art of scientific programming, Cambridge University Press.

Privette, J. L., Myneni, R. B., Emery, W. J., et Pinty, B., 1995, Inversion of a soil bidirectional reflectance model for use with vegetation BRDF models, Journal of Geophysical Research, 100(D12):25497-25508.

Rondeaux, G., Steven M., et Baret F., 1996. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. Remote Sensing of Environment 55 :95-107.

Ross, J., 1975, The radiation regime and architecture of plant stands. Leningrad, Gidrometeoizdat, 342 pp.

Ross, J.K., 1981, The radiation regime and architecture of plant stands, Dr. W. Junk Publishers, Boston, 1981.

Sellers, P.J., 1985, Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration, International Journal of Remote Sensing, 8 :1335

Siegfriend, A. W., Gerstl et Zardecki, 1985, Discrete-ordinates finite-element method for atmospheric radiative transfer and remote sensing. Applied Optics Vol. 24, No 1.

Stratton, J.A. , 1941, Electromagnetic theory. McGraw Hill Book, New York, USA, 615pp.

Tanré, D., Herman, M., Deschamps, P.Y., 1981, Influence of background contribution upon space measurements of ground reflectance, Applied Optics, Vol. 20, No. 20, pp. 733-741.

Thompson, R. L., et Goel, N. S., 1998, Two models for rapidly calculating bidirectional reflectance : Photon spread (ps) model and statistical photon spread (sps) model, Remote Sensing Reviews, 16, 157-207.

Trichon, V., 1996, Hétérogénéité spatiale des structures en forêt naturelle de basse altitude à Sumatra, Indonésie, Thèse, Université Paul Sabatier, Toulouse, France.

Trichon, V., et Gastellu-Etchegorry, J.P., 1996, A modelling approach of PAR environment in a tropical rain forest in Sumatra : Application to remote sensing. Proceedings Ecological Summit 96, Copenhagen (Denmark).

Tucker, C.J., 1979, Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, Remote Sensing of the Environment, 8 :127-150.

Valorge, C., 2000, Télédétection et Traitement des images – Introduction, Cours École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et l'Espace.

Vanderbilt, V.C., Frant, L., et Ustin, 1991, Polarization of light by vegetation, Photon-vegetation Interactions, R.B. Myneni and J. Ross Eds., p.191-226.

Verhoef, W., 1985, Earth observation modeling based on layer scattering matrices, Remote Sensing of Environment, Vol. 17, p 164-178.

Vermote, E., Tanré, D., Deuze, L., Herman, N., et Morcrette, J.J, 1996, Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum (6S), 6S user's guide, version 2. Laboratoire d'Optique Atmosphérique, Lille, France, 214 pp.

Verstraete, M. M. et Pinty, B., 1996, Designing optimal spectral indices for remote sensing applications, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 34, 1254-1265.

Weiss, M., Baret, F., Myneni, R. B., Pragnere, A. et Knyazikhin, Y., 2000, Investigation of a model inversion technique to estimate canopy biophysical variables from spectral and directional reflectance data. Agronomie, 20, 3-22.

Woolley, J.T., 1971, Reflectance and transmittance of light by leaves. Plant Physiology, 47: 656-662.

Young, A.T., 1980, Revised Depolarization Corrections for Atmospheric Extinction. Applied Optics, 19, 3427-3428.