Centre d'Etudes Spatiales de la BIOsphère (Paul Sabatier University, CNES, CNRS, IRD

PRINCIPES PHYSIQUES DE DART

Reference:	DART_handbook_fr-V2.doc
Release date:	18.04.2007
Author:	CESBIO

Associated industrial company: Magellium - 10, avenue de l'Europe
31520 Ramonville Saint-Agne. – France
☎: 05 61 28 81 30 - Fax: 05 61 28 56 00 - www.magellium.fr - APE

PRINCIPES PHYSIQUES DE DART

I INTRODUCTION *3*

II MODELISATION DU PAYSAGE ET DU TRANSFERT RADIATIF *3*

1 Modélisation du paysage **3**
2 Modélisation du transfert radiatif **11**
3 Base de données atmosphériques **16**
4 Modélisation des images dans le plan du capteur **19**

III DIFFUSION ET ÉMISSION DES MILIEUX OPAQUES *23*

1 Mécanismes de diffusion **23**
2 Mécanismes d'émission **27**
3 Point origine du rayonnement diffusé ou émis **28**
4 Suivi de rayon diffusé ou émis **29**

IV DIFFUSION ET ÉMISSION DES MILIEUX TURBIDES ET MIXTES *30*

1 Transmission et Interception du rayonnement **31**
2 Diffusion volumique d'une cellule turbide **34**
3 Diffusion d'une cellule turbide **36**
4 Diffusion d'une cellule mixte **42**
5 Principes de l'émission thermique **45**
6 Émission d'une cellule turbide "Air" **46**
7 Émission d'une cellule turbide de végétation **47**
8 Émission d'une cellule mixte **52**

V MODES DE FONCTIONNEMENT ET PRODUITS DART *54*

1 Présentation **54**
2 Etapes majeures d'une simulation **58**
3 Mode (T) **64**
4 Produits DART atmosphériques en mode (R) **66**
5 Produits atmosphériques en mode T ou "R + T" **67**
6 Produits de DART **68**

I INTRODUCTION

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

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

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

II MODELISATION DU PAYSAGE ET DU TRANSFERT RADIATIF

1 MODELISATION DU PAYSAGE

● *Discrétisation spatiale du paysage*

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

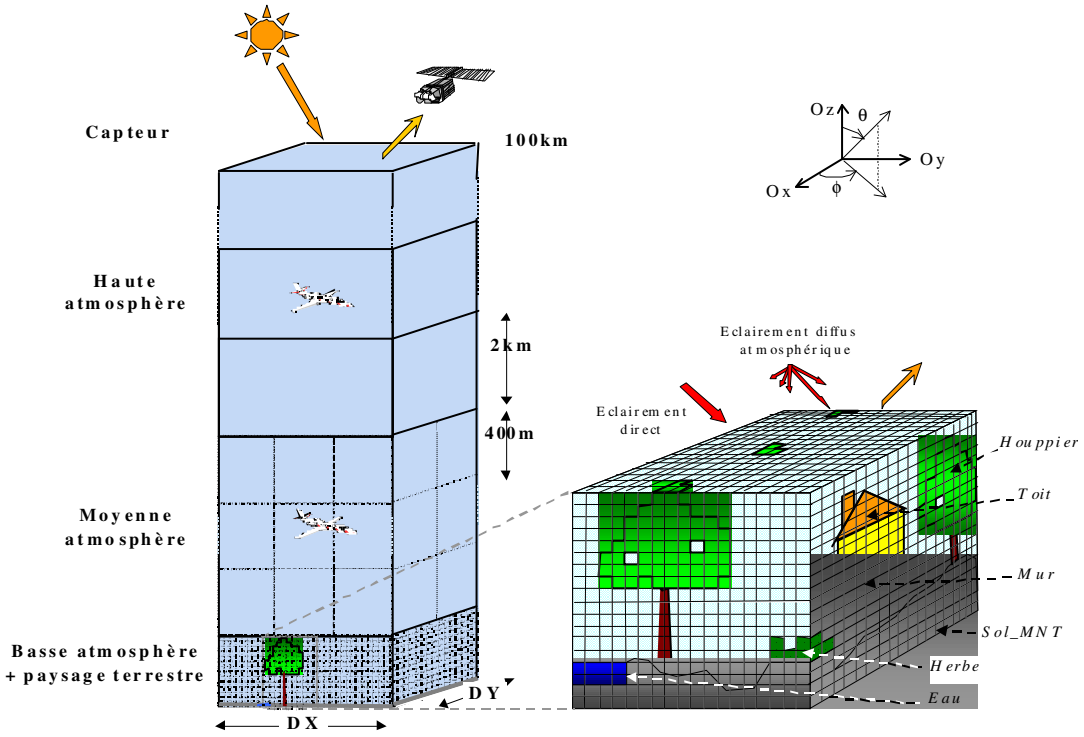


Figure II.1: Représentation schématique du système "Paysage terrestre – Atmosphère - Capteur".

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

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

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

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

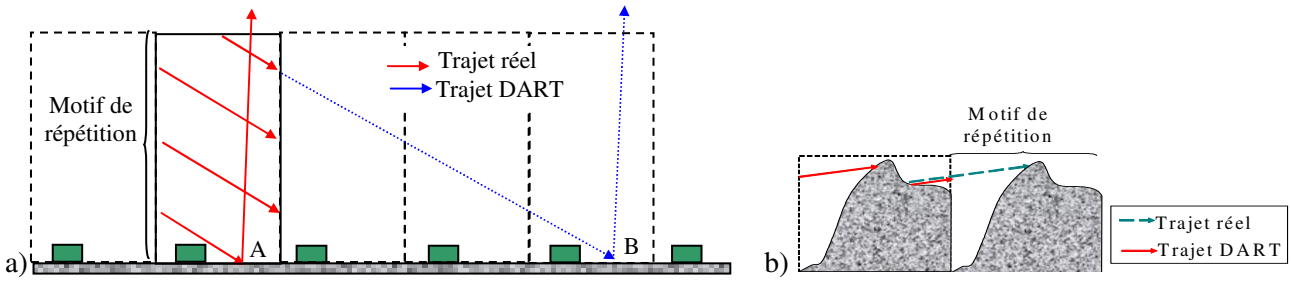


Figure II.2: a) Suivi de rayons dans un paysage infini répétitif (d'après Gascon, 2001). Trajet réel et trajet simulé dans la maquette DART. Les points A et B sont équivalents. b) Paysage répétitif.

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

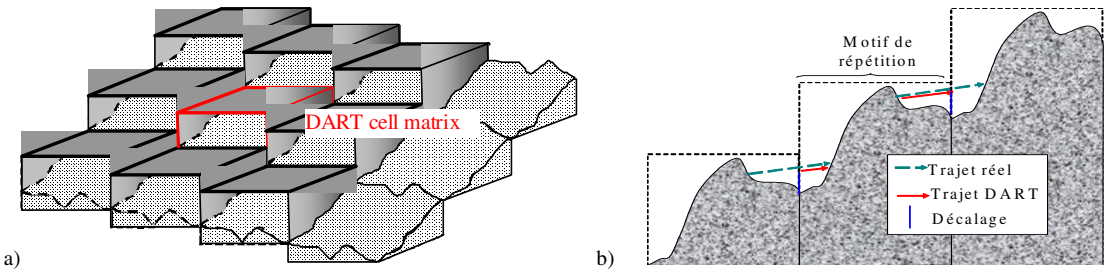


Figure II.3: a) Paysage infini avec continuité du relief. b) Suivi de rayon associé.

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

● ***Types de paysages***

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

● ***Catégories de cellules***

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

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

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

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

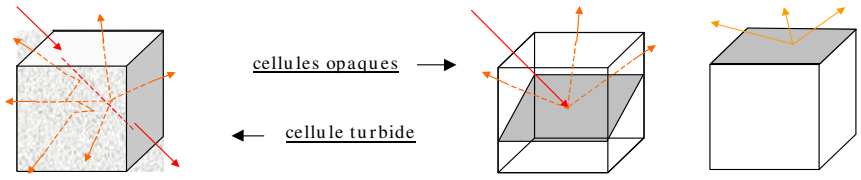


Figure II.4 : Diffusions volumiques (cellule turbide) et surfaciques (cellule opaque).

La simulation informatique du paysage "Terre + Atmosphère" simulé est constitué de 4 fichiers (*cf.* V) dont le fichier *mak* qui stocke la matrice rectangulaire du paysage où chaque cellule (Tableau II.1) est repérée par un indice (Type) caractéristique du milieu représenté et *i* caractéristiques (C_i) optiques et/ou structurales (LAI, indice des figures qui traversent la cellule, *etc.*).

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

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

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

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

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

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

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

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

● ***Modélisation des arbres***

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

- *Distribution spatiale des arbres*

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

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

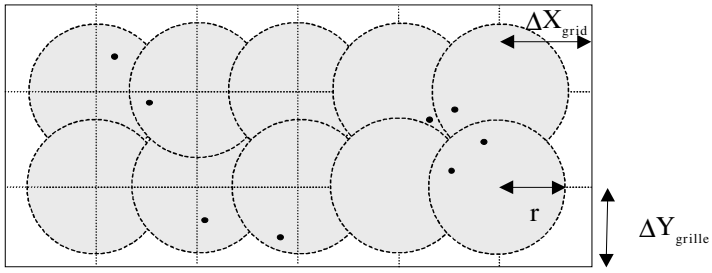


Figure II.5: Exemple de grille de distribution des arbres (•). Ici, P_{tree}=0.8.

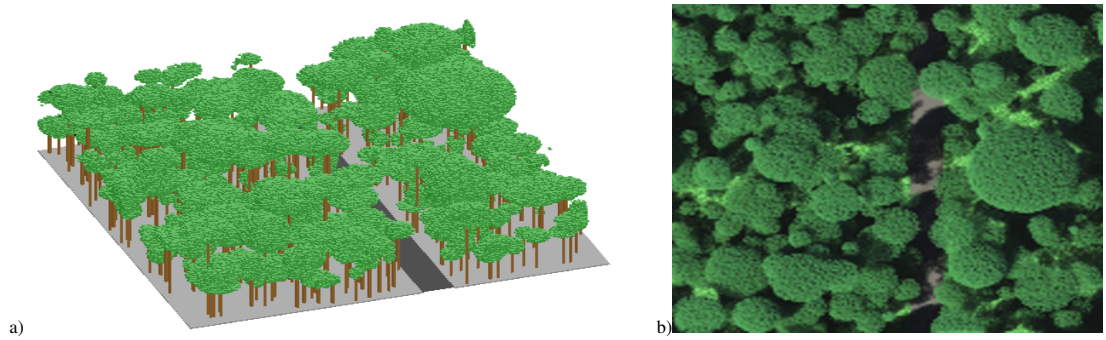


Figure II.6: a) Simulation de forêt (option 1). b) Image DART associée. θ_v=0°, θ_s=30°. 100x100 cellules.

- *Description des arbres*

Un arbre comprend un tronc et une couronne de hauteur {$H_c[j]$, σ($H_c[j]$)} (options 2 et 3) ou {$H_c[j]$} (option 1). Celle-ci est divisée en L niveaux horizontaux de hauteur %h[j,l].{$H_c[j]$, σ($H_c[j]$)} où %h[j,l] est la hauteur relative et $l \in [1 \quad L]$. Le tronc (*Figure II.7*) est la superposition de blocs parallélépipédiques (*i.e.* 4 rectangles verticaux et 1 carré horizontal). Sa partie basse est sous la couronne. Elle a des propriétés optiques $\rho_{T,b}[j]$ ou $\varepsilon_{T,b}[j]$ (réflectance ou émissivité de l'écorce parmi 3 diffuseurs *cf.* 1), une hauteur $H_{T,b}[j]$ et un diamètre $Ø_{T,b}[j]$. Sa partie haute est à l'intérieur de la

couronne avec une possibilité de dépasser son sommet. Elle comprend L niveaux (blocs). Chaque niveau *l* est associé à $\rho_{T,w}[j,l]$ ou $\varepsilon_{T,w}[j,l]$, et un diamètre $\varnothing_{T,w}[j,l]$ calculé à partir du diamètre relatif $\%\varnothing_{T,w}[j,l]$. Le calcul des dimensions des arbres diffère donc selon l'option de distribution des arbres :

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

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

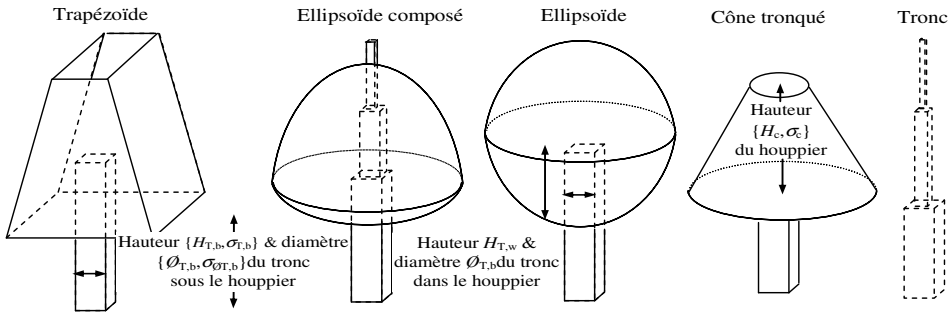


Figure II.7 : Formes schématiques 3-D de troncs et des couronnes.

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

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

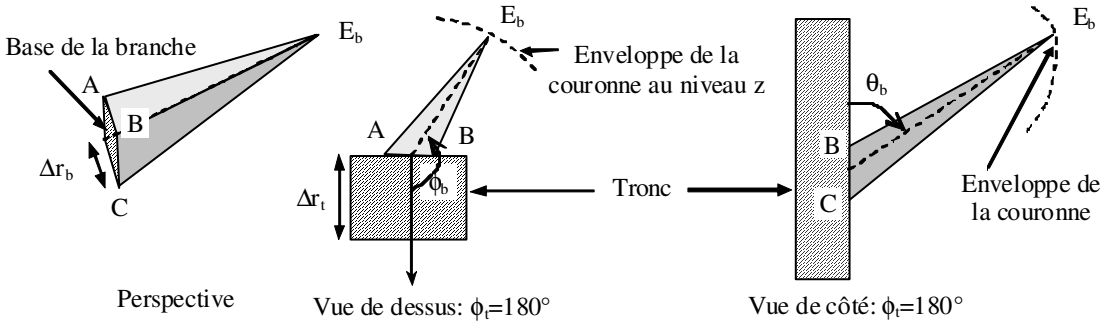


Figure II.8: Simulation de branche. Branche = 4 triangles centrés sur un axe prédéfini $\Omega_b(\theta_b,\Phi_b)$. La base de la branche est un carré (côté Δr_b) sur le tronc vertical. Chaque espèce d'arbre (j) a une distribution spécifique des branches spécifiée dans un fichier texte" branch.src".

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

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

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

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

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

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

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

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

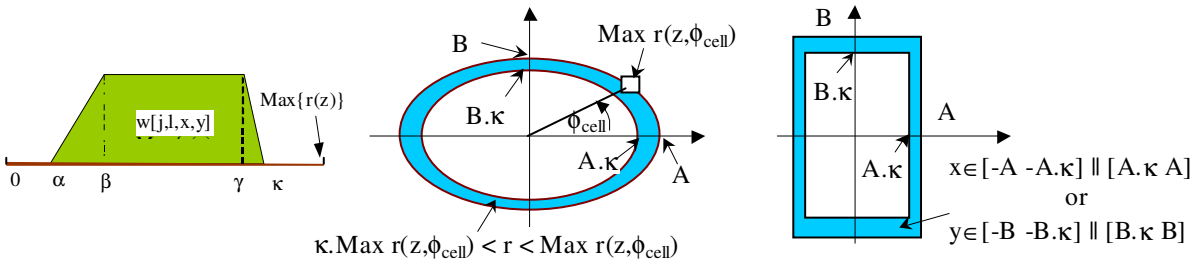


Figure II.9: Distribution horizontale w[j,l,x,y] de u_f pour des couronnes axiale et trapézoïdale. A et B sont les dimensions de la section horizontale de la couronne. Elles dépendent de l'altitude z. Dans le cas d'une couronne homogène, L = 1 et α[j,l] = β[j,l] = 0, γ[j,l] = κ[j,l] = 1.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

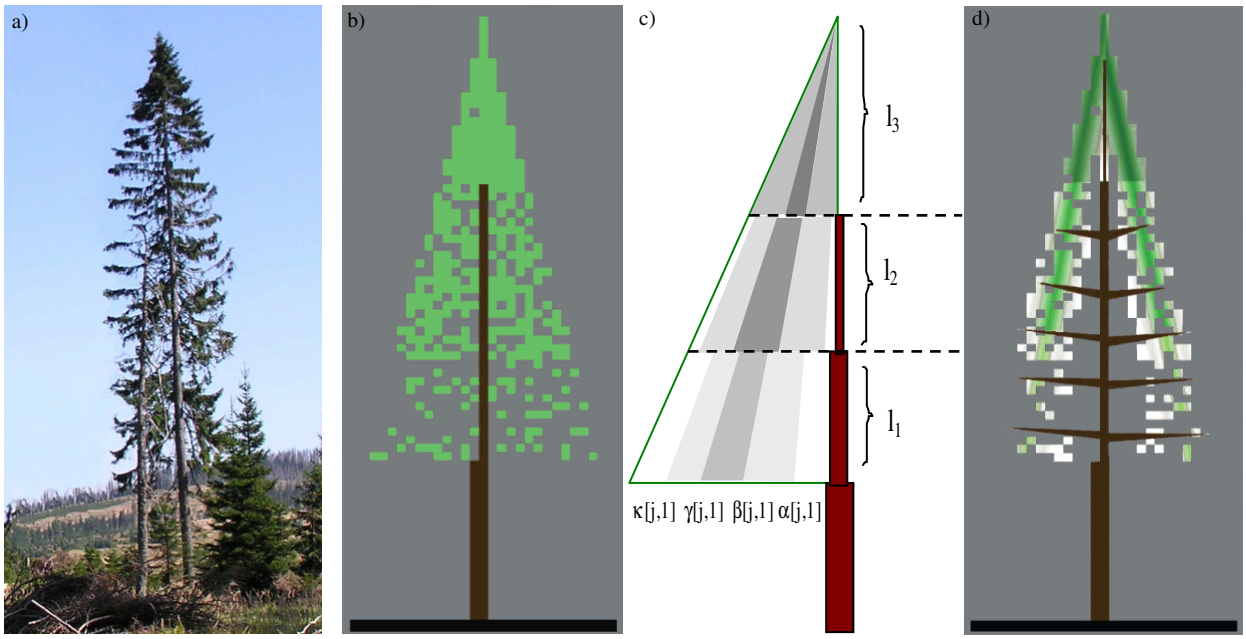


Figure II.10: a) Sapin de Norvège (Mts. Šumava, République Tchèque, 2003). b) Ancienne maquette DART. c, d) Nouvelle maquette DART avec branches et houppier à 3 niveaux.

2 MODELISATION DU TRANSFERT RADIATIF

● ***Aspects théoriques***

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

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

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

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

● ***Modélisation DART***

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

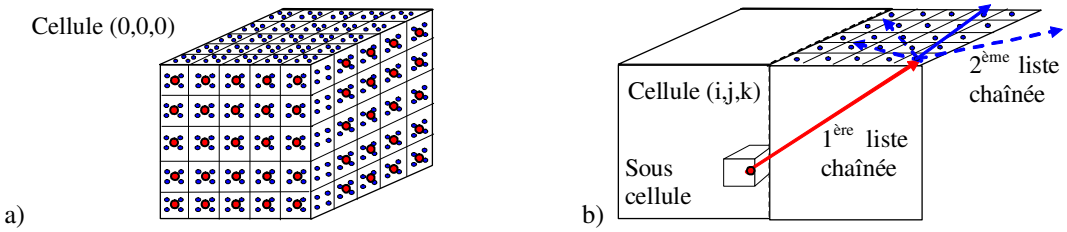


Figure II.11: (a) N_{sc}^3 sous-centres et $6.N_{sf}^2$ sous-faces de la cellule $\boldsymbol{O}$ (0,0,0). (b) Rayon issu du centre d'une sous-cellule de coordonnées (i, j, k).

● ***Illumination de la scène***

L'éclairement au bas de l'atmosphère (*i.e.* BOA : Bottom Of the Atmosphere) comprend 2 composantes : solaire direct $W_{sBOA,q}(\Omega_s)$ et/ou atmosphérique diffus $W_{aBOA,q}(\Omega_n)$. Les origines des flux associés sont les cellules de la couche horizontale, appelée couche fictive, juste au dessus du paysage terrestre.

Depuis chaque cellule, n^2 vecteurs source $W_{sBOA,q}(\Omega_s)$ simulent le rayonnement solaire direct selon $\Omega_s(\theta_s,\varphi_s)$, pour l'intervalle spectral q. Par défaut n=7. Avec la notation $\Delta x.\Delta y = \frac{\Delta x.\Delta y}{n^2}$, on a :

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

Les vecteurs sources de l'éclairement atmosphérique sont :

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

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

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

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

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

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

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

Il existe 2 modes de fonctionnement du modèle DART :

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

● ***Approche itérative***

Les rayons sont suivis avec une approche itérative. Tout d'abord (*i.e.* itération $k = 0$), tous les rayons $W_0(r,\Omega_n)$ issus des sources présentes sont simulés. Durant leur propagation, ces rayons rencontrent des cellules élémentaires. Divers mécanismes d'interaction surviennent selon les propriétés optiques et structurales des éléments contenus dans ces cellules. Les rayons traversent les cellules vides, mais sont totalement interceptés par toute figure de cellule opaque (*e.g.* cellules "sol", "eau", "route"), et en partie interceptés et transmis par les cellules semi-opaques (*e.g.* cellules "végétation", "urbain", "tronc") ou mixtes. La puissance des rayons varie durant leur propagation : diminution par interception

(absorption/diffusion) et augmentation par émission thermique. A l'itération k = 1, la diffusion de rayonnement intercepté engendre de nouveaux rayons $W_1(r,\Omega_n)$ selon les N_{dir} directions de l'espace. Le long de leurs trajets, ces rayons engendrent de nouveaux mécanismes de diffusion $W_k(r,\Omega_n)$ ($k \in [2\ \infty[$). A chaque itération, les rayons incidents sur les cellules de la couche fictive et/ou les cellules à l'altitude du capteur et/ou en haut de l'atmosphère, sont stockés. Ce processus prend fin quand tous les rayons sont sortis par le haut de la maquette ou jusqu'à ce que leur intensité devienne inférieure à un seuil.

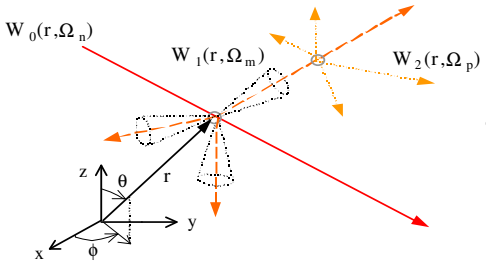


Figure II.12:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- un fichier 3-D de température est disponible,
- une phase d'illumination dans les courtes longueurs d'ondes détermine le rayonnement absorbé par tout élément, ce qui permet de lui affecter une température, sachant que la température de tout milieu turbide et surface opaque (*Sol*, *Eau*, *Route, Plot_Opaque*, *Mur, Toit, etc*) est comprise dans un intervalle pré-défini (*cf. 1* fichier *coeff_diff.src*) spécifique. Seuls, les murs bordant la maquette ont une température définie.

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

3 BASE DE DONNEES ATMOSPHERIQUES

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

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

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

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

- *2 paramètres indépendants de l'altitude* :
  - Fonction de phase (fonction Rayleigh) des gaz (sr^{-1}) : $P_m(\Psi_{i,v}) \approx 0.7552 + 0.7345.\cos^2(\Psi_{i,v})$.
  - $\frac{P_p(\Psi_{i,v})}{4\pi}$: Fonction de phase des aérosols (sr^{-1}). Etant très anisotrope (avant et arrière), cette fonction est approchée par la somme pondérée de 2 fonctions de Henyey-Greenstein :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- *Opérateur* (mode R mono-spectral) : éclairement solaire E_λ ($W.m^{-2}.\mu m^{-1}$), facteur d'échelle des gaz H_m (m), épaisseur optique τ_m^d de diffusion des gaz, transmittance T_m^a des gaz d'absorption, facteur d'échelle H_p (m) des aérosols, épaisseur τ_p optique des aérosols, albédo ω_p des aérosols, coefficients g_{1p} , g_{2p} et a_p des 2 fonctions de Henyey-Greenstein et altitude du capteur (H_{Capt}).
- *Base de données atmosphériques* (BDA) : valeurs spectrales de 0.3μm à 15μm avec un pas de 1 ou de 10 cm^{-1} dérivées de mesures ou d'un modèle atmosphérique comme MODTRAN (Berk *et al.*, 1989). Elle est stockée respectivement dans les fichiers texte *database1.txt* et *database10.txt*.
  - 7 modèles gazeux : 1 éditable et 6 classiques {"*US Standard 1976*", "*Tropical*" (15° nord), "*Mid-Latitude Summer*" (45° nord - juillet), "*Mid-Latitude Winter*" (45° nord - janvier), "*Sub-Arctic Summer*" (60° nord - juillet), "*Sub-Arctic Winter*" (60° nord - janvier)}.
  - 7 modèles d'aérosols : 1 éditable et 6 classiques {"*Rural V=23km et V=5km*" (poussières principalement), "*Maritime V=23km*" (aérosols maritimes), "*Urban V=5km*" (pollution urbaine), "*Tropospheric V=50km*" (très faible quantité), "*Fog Radiation V=0.5km*" (composants hydriques). Le terme *V* indique la visibilité horizontale.

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

- Constante solaire spectrale TOA $E_{\lambda 0}$ ($W.m^{-2}.\mu m^{-1}$) à la distance Terre-Soleil moyenne (149.10^6km), de 0.3µm à 15µm. Par suite, la constante E_λ pour le jour Julien J ([1 365]) est :
  $E_\lambda = E_{\lambda 0}.[1 + e.\cos(\frac{2\pi(J-3)}{365})]^{-2}$ où (e) est l'excentricité de l'orbite terrestre (e≈0.0167)
- Profils verticaux des températures pour les 6 modèles gazeux classiques (US Standard, Tropical, Mid Latitude Summer, Mid Latitude Winter, Sub Arctic Summer et Sub Arctic Winter).
- Paramètres α et β de la loi d'Angstrom : des gaz non absorbants : l'épaisseur optique spectrale de l'ensemble des gaz, pour la diffusion, est supposée suivre la loi $\tau(\lambda) = \alpha.\lambda^{-\beta}$ (Lenoble, 1993).
- Facteurs d'échelle des gaz H_m : ils ont été calculés par régression sur les profils de densité volumique des gaz absorbants (H_2O, CO_2, CO, CH_4, N_2O) et diffusants (O_2, N_2) majeurs, pour les 7 modèles gazeux. Les coefficients d'extinction associés sont : $\alpha(z) = \frac{\tau}{H}.\exp[-\frac{\tau}{H}]$ où $\tau = \tau_m^a$ ou τ_m^d.
- Profil de fraction de O_3 (de 0 à 50km, Δz = 1km) : pour les 7 modèles gazeux.
- Transmittance spectrale (0.3 à 15µm) des gaz absorbants (T_m^a) pour les 7 modèles gazeux.
- Transmittance spectrale (0.3 à 15µm) T_{H20} (d_{H20}) de H_2O pour 20 épaisseurs d'eau précipitable d_{H20} (0.1 à 5 cm) distribuées selon l'atmosphère "*US Standard 1976*". Le mode "Configurable" permet de spécifier l'épaisseur d_{H20} pour les 7 modèles. DART interpole T_{H20} pour ce d_{H20}. Pour plus de précision, les T_{H20} peuvent être celles associées au modèle gazeux considéré. L'eau est traitée de manière particulière du fait de sa forte variabilité dans l'espace et le temps.
- Facteurs d'échelle des aérosols (H_p) : pour les 7 modèles d'aérosols.
- Albédo (ω_p) et épaisseur optique (0.3 à 15µm) des aérosols (τ_p) pour les 7 modèles d'aérosols.
- Paramètres g_{1p}, g_{2p} et a_p de la fonction de phase des aérosols pour les 7 modèles d'aérosols.

Option	Constituant	Paramètres	Description
L'utilisateur spécifie : τ et H_m		E_λ	Constante solaire
	GAZ	H_m	Facteur d'échelle moyen pour les gaz
		τ_m^d	Épaisseur optique pour la diffusion des gaz
		T_m^a	Transmittance due à l'absorption gazeuse
	AEROSOLS	τ_p, H_p	Épaisseur optique et facteur d'échelle (aérosols)
		ω_p, g_{1p}, g_{2p}, a_p	Albédo et paramètres de la fonction de phase (aérosols)
Configuration pré-définie (base de données)		λ_{min} , λ_{max}	Longueur d'onde minimale et maximale (μm)
		J	Jour Julien
	GAZ	n° type (d_{H2O} si n° type=7)	Manual (0), US Standard (1), Tropical (2), Mid Latitude Summer (3) / Winter (4), Sub-artic Summer (5) / Winter (6), User define (7)
	AEROSOLS	n° type	Editable (0), Rural V=23km (1), Rural V=5km (2), Maritime V=23km (3), Urban V=5km (4), Tropospheric V=50 km (5), Fog Radiation V=0.5km (6)

Tableau II.3 : Paramètres atmosphériques utilisés par DART

4 MODELISATION DES IMAGES DANS LE PLAN DU CAPTEUR

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

La discrétisation combinée du paysage et de l'éclairement (*i.e.* n^2 vecteurs source par cellule de la couche fictive ; par défaut n = 7) explique que des éléments plans (*e.g.* toit de maison) de propriétés optiques identiques sur toute leur surface apparaissent dans les images simulées avec des surfaces de propriétés optiques non identiques, surtout pour les directions de visée obliques. Ce défaut est réduit en sur-échantillonnant la grille (plan horizontal) qui stocke les images et en étalant l'énergie stockée dans cette grille. La projection des images dans le plan du capteur comprend 3 étapes (Gentine, 2002) :

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

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

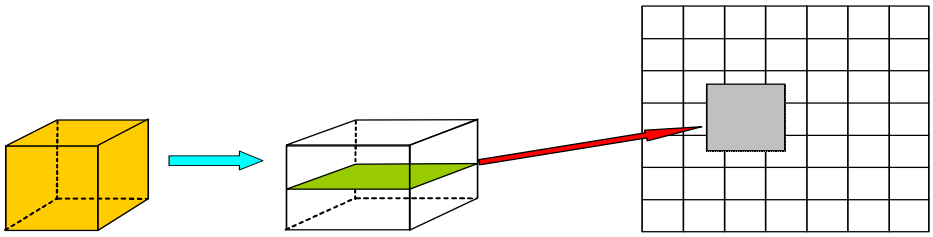


Figure II.13 : Projection sur la maille horizontale de la surface caractéristique de toute cellule ($\Delta X*\Delta Y$ à mi-hauteur) turbide (Houppier,...) et mixte (e.g., milieu turbide de Opaque_nT).

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

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

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

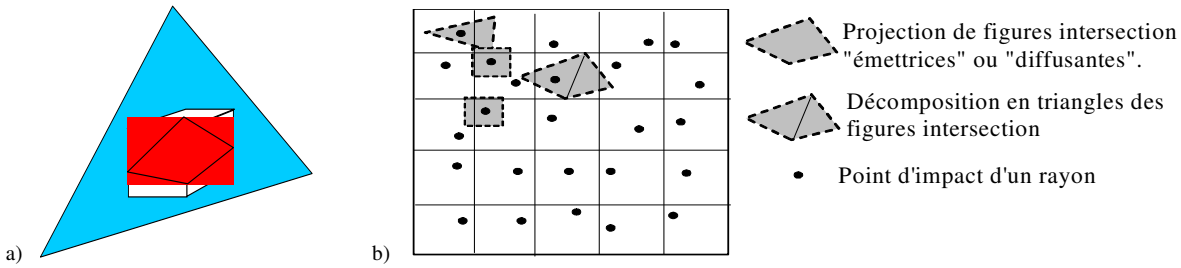


Figure II.14: a) Intersection (rouge) d'un triangle (bleu) avec une cellule. b) Projection de figures dans la maille horizontale (couche fictive) en haut de BA

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

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

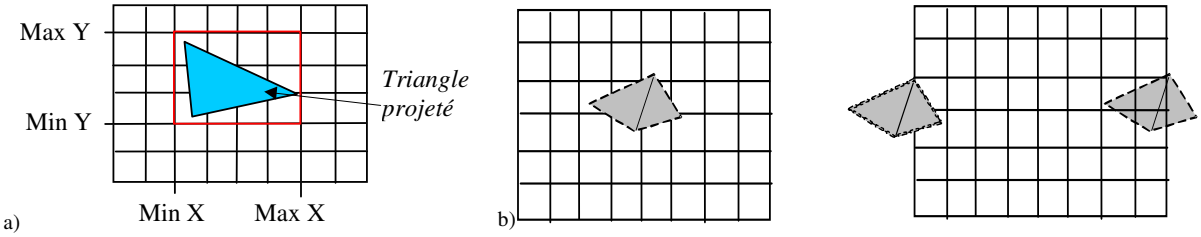


Figure II.15 : a) Bornes d'un triangle projeté sur la couche fictive. b) Projection dans et hors de la maille.

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

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

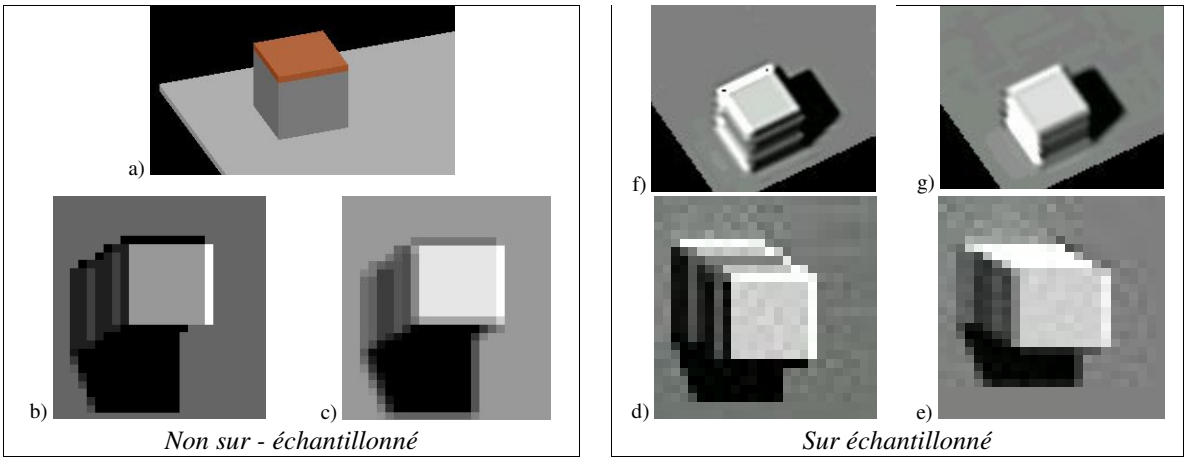


Figure II.16: Images de l'immeuble (a) BOA (b,c,d,e) et dans le plan du capteur (f et g), sans (b,d,f) et avec (c, e, g) étalement. Visée et éclairement (θ_s = 140°, φ_s = 20°) obliques. L'étalement atténue les contrastes fictifs sur les bords de l'immeuble.

- ***Géoréférencement***

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

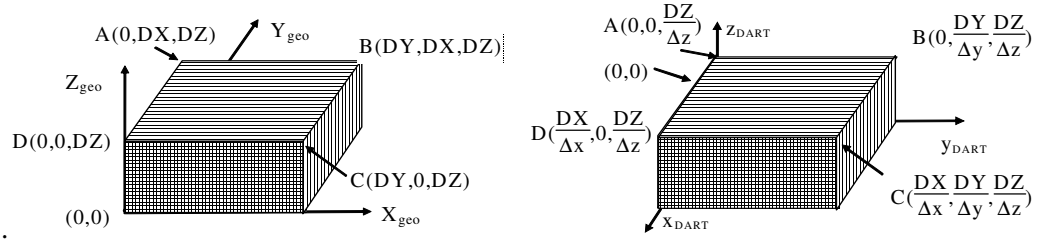
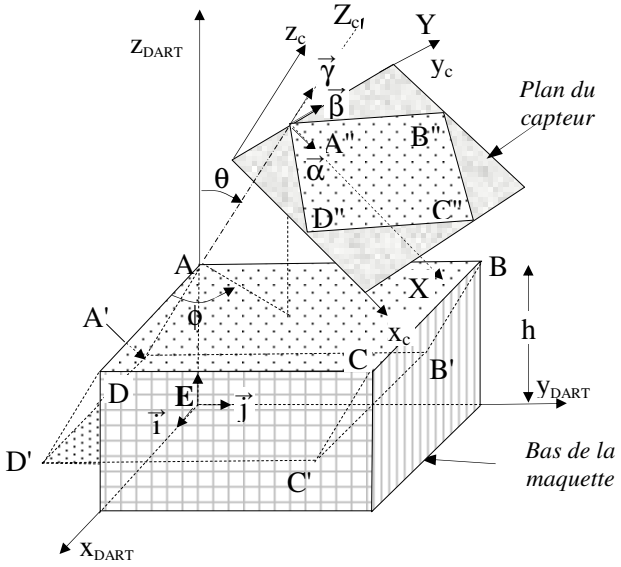


Figure II.17 : Repère géographique (gauche) et repère DART (droite). $x_{DART} = \frac{DX - Y_{geo}}{\Delta x}$ *et* $y_{DART} = \frac{X_{geo}}{\Delta y}$



h est la hauteur de la maquette terrestre.

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

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

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

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

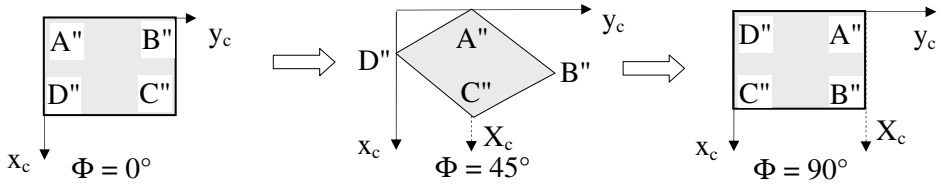
Figure II.18: Repères DART : maquette {i,j,k}, image horizontale {A,B,C,D}, image capteur {x_c,y_c,z_c}.

Le géoréférencement des images horizontales associe aux coordonnées image (colonne, ligne) des points {A,B,C,D} les coordonnées géographiques des projetés de ces points (*i.e.*, points {A',B',C',D'} du plan $\{O,X_{geo},Y_{geo}\}$, selon la direction de visée $\{\theta_v,\Phi_v\}$. Cette opération correspond à la translation {-h.tanθ.cosΦ, -h.tanθ.sinΦ, h} :

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

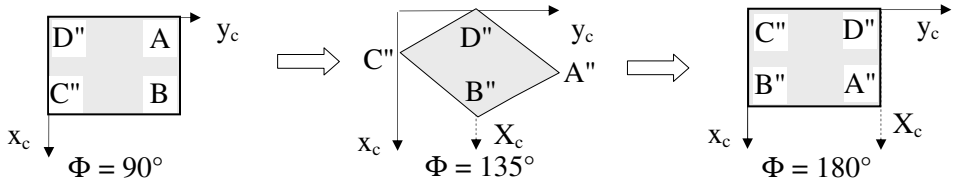
Le géoréférencement des images dans le plan du capteur associe aux coordonnées image (colonne, ligne) des points {A",B",C",D"}, projetés de {A,B,C,D} dans le plan du capteur, les coordonnées géographiques des projetés de {A,B,C,D} dans le plan $\{O,X_{geo},Y_{geo}\}$ selon la direction de visée $\{\theta_v,\Phi_v\}$.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

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



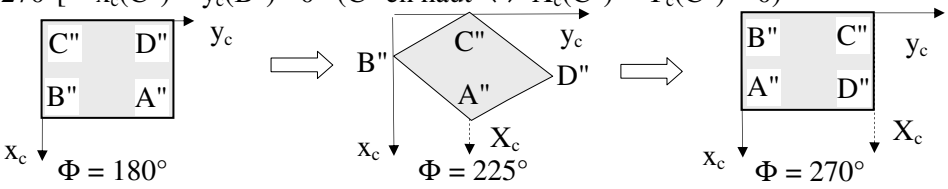
$$\begin{aligned} &A"(0,\ \eta.\sin\Phi.DX) && B"(\eta.\cos\theta.\sin\Phi.DY,\ \eta.\cos\Phi.DY + \eta.\sin\Phi.DX)\\ &C"(\eta.\cos\theta.(\cos\Phi.DX + \sin\Phi.DY),\ \eta.\cos\Phi.DY) && D"(\eta.\cos\theta.\cos\Phi.DX,\ 0) \end{aligned} \qquad \text{(II-20)}$$

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



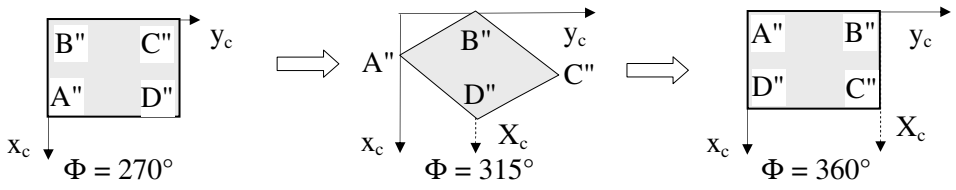
$$\begin{aligned} &A"(-\eta.\cos\theta.\cos\Phi.DX,\ \eta.\sin\Phi.DX - \eta.\cos\Phi.DY) && B"(-\eta.\cos\theta.\cos\Phi.DX + \eta.\cos\theta.\sin\Phi.DY,\ \eta.\sin\Phi.DX)\\ &C"(\eta.\cos\theta.\sin\Phi.DY,\ 0) && D"(0,\ -\eta.\cos\Phi.DX) \end{aligned} \qquad \text{(II-21)}$$

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



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

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



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

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

● ***Réponse du capteur***

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

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

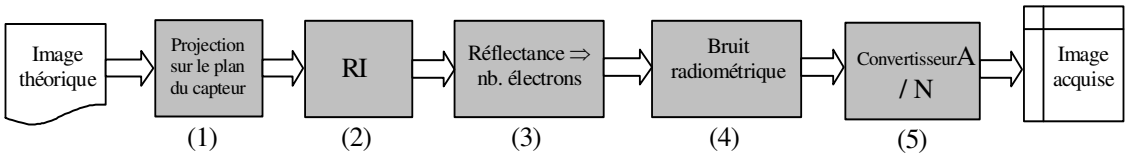


Figure II.19 : Schéma de la chaîne de simulation du système radiométrique.

III DIFFUSION ET ÉMISSION DES MILIEUX OPAQUES

Les propriétés optiques des figures opaques sont caractérisées par la fonction de transfert diffuse $T_d(\Omega_s,\Omega_v)$ dérivée de mesures bi-directionnelles ou de modèles de sol (*e.g.*, Hapke, 1981) avec ou sans composante spéculaire $T_s(\Omega_s,\Omega_v)$ et composante de polarisation $T_p(\Omega_s,\Omega_v)$. Le module *Phase* (*cf.* 1) pré-calcule $T_s(\Omega_s,\Omega_v)$ et $T_p(\Omega_s,\Omega_v)$ avec les paramètres entrés par l'opérateur (mode monospectral) ou lus dans une base de données (*cf.* 1 ; Handbook, 2006) de réflectance spectrale (mode multispectral).

1 MECANISMES DE DIFFUSION

Soit un vecteur puissance $W_{in}(\Omega_s)$ incident sur une portion de plan opaque (*Figure III.1*) de normale (Ω_n) et de facteur de réflectance bi-directionnelle $\rho(\Omega_s,\Omega_v)$. La puissance diffusée par cette surface, selon un cône angulaire $(\Omega_v,\Delta\Omega_v)$, est calculée à partir de l'énergie interceptée $W_{int}(\Omega_s)$:

$$W_{diff}(\Omega_v) = T_d(\Omega_s,\Omega_v).W_{int}(\Omega_s) \qquad \text{(III-1)}$$

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

$$T_d(\Omega_s,\Omega_v) = \frac{\rho(\Omega_s,\Omega_v)}{\pi}.\cos(\Psi_{vn}).\Delta\Omega_v \qquad \text{où } \cos(\Psi_{vn}) = |\Omega_v.\Omega_n| \qquad \text{(III-2)}$$

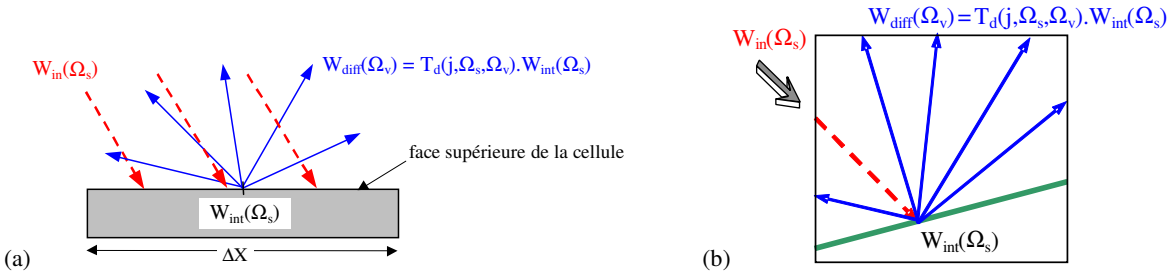


Figure III.1: Schéma des interactions au sein d'une cellule "opaque" : (a) cellules Sol, Eau, Route, Plot_Opaque. (b) cellules contenant des portions de plan.

Les 4 types possibles de diffuseur des cellules opaques sont :

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

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

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

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

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

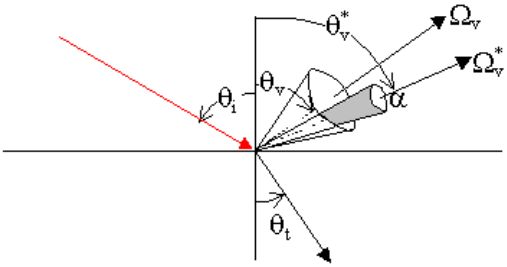


Figure III.2: Notations utilisées pour représenter la réflexion spéculaire de Fresnel

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

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

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

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

$$W_{spe} = \pi . W_{int}(\Omega_s).\{[\frac{tg(\theta_i-\theta_t)}{tg(\theta_i+\theta_t)}]^2 + [\frac{\sin(\theta_i-\theta_t)}{\sin(\theta_i+\theta_t)}]^2\}.A.\frac{\alpha^4}{64}.[1 - \frac{\alpha^2}{72}] \quad \text{(III-5)}$$

Le facteur de réflectance direct-hémisphérique est donc :

$$\rho_{spe,dh}(\Omega_s) = \frac{W_{spe}}{W_{int}(\Omega_s)} = \pi.\{[\frac{tg(\theta_i-\theta_t)}{tg(\theta_i+\theta_t)}]^2 + [\frac{\sin(\theta_i-\theta_t)}{\sin(\theta_i+\theta_t)}]^2\}.A.\frac{\alpha^4}{64}.[1 - \frac{\alpha^2}{72}] \quad \text{(III-6)}$$

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

$$\rho_{spe,hh}(\Omega_s) = \frac{\int W_{spe}.d\Omega_s}{\int W_{int}(\Omega_s).d\Omega_s} \approx \frac{\Sigma_i \pi.\{[\frac{tg(\theta_i-\theta_t)}{tg(\theta_i+\theta_t)}]^2 + [\frac{\sin(\theta_i-\theta_t)}{\sin(\theta_i+\theta_t)}]^2\}.A.\frac{\alpha^4}{64}.[1 - \frac{\alpha^2}{72}].L.S.\cos\theta_i.\Delta\Omega_i}{\Sigma_i L.S.\cos\theta_i.\Delta\Omega_i} \quad \text{(III-7)}$$

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

$$\rho_{spe,hh}(\Omega_s) \approx \pi.A.\frac{\alpha^4}{32}.[1 - \frac{\alpha^2}{72}].\Sigma_i \{[\frac{tg(\theta_i-\theta_t)}{tg(\theta_i+\theta_t)}]^2 + [\frac{\sin(\theta_i-\theta_t)}{\sin(\theta_i+\theta_t)}]^2\}.\cos\theta_i.\sin\theta_i.\Delta\theta_i \quad \text{(III-8)}$$

$\rho_{spe,hh}(\Omega_s)$ est calculé par le module *phase* qui le stocke dans le fichier "*coeff_diff.src*" (*cf.* 1).

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

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

$$W_{spe}(\Omega_v,\Delta\Omega_v) \approx W_{spe}.\frac{\Delta\Omega_v^{'}.[\frac{\alpha^2}{4}-\Psi_{vv*}^2]}{\Sigma\,\Delta\Omega_v^{'}.[\frac{\alpha^2}{4}-\Psi_{vv*}^2]} \quad (\Delta\Omega_v^{'} \approx \Delta\Omega_v \text{ si } \Delta\Omega_v < \Delta\Omega_v^{*} \text{ et } \Delta\Omega_v^{'} \approx \Delta\Omega_v^{*} \text{ si } \Delta\Omega_v > \Delta\Omega_v^{*}) \quad \text{(III-9)}$$

L'algorithme implémenté comprend 3 étapes :

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

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

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

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

$$W_{pol}(\Omega_v,\Delta\Omega_v) \approx W_{spe}(\Omega_v,\Delta\Omega_v).\frac{R_V-R_H}{R_V+R_H} \quad \text{avec } R_V = [\frac{\sin(\theta_i-\theta_t)}{\sin(\theta_i+\theta_t)}]^2 \quad \text{et} \quad R_H = [\frac{tg(\theta_i-\theta_t)}{tg(\theta_i+\theta_t)}]^2 \qquad \text{(III-10)}$$

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

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

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

$$\rho_{Hapke}(\Omega_s,\Omega_v,\Omega_n) = \frac{\omega}{4}.\frac{1}{\cos(\psi_{vn}) + |\cos(\psi_{sn})|}.[[1+B(g_1)].P(g_1,g_2)+H(\omega,|\cos(\psi_{sn})|).H(\omega,\cos(\psi_{vn}))-1] \qquad \text{(III-11)}$$

$$B(g_1) = \frac{B_0}{1+\frac{1}{h}.\tan(\frac{g_1}{2})} \qquad H(\omega,x) = \frac{1+2.x}{1+2.\gamma.x} \qquad \gamma = (1-\omega)^{0.5} \qquad \text{(III-12)}$$

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

$$P(g_1,g_2) = 1 + b_1.\cos g_1 + c_1.\frac{3.\cos^2(g_1)-1}{2} + b_2.\cos(g_2) + c_2.\frac{3.\cos^2(g_2)-1}{2} \qquad \text{(III-13)}$$

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

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

$$<\rho(\Psi_{nv})> = \frac{1-(1-\omega)^{0.5}}{1+2.(1-\omega)^{0.5}.\cos\Psi_{nv}} + \rho_{spe,hd}(\Omega_v) \qquad \text{(III-14)}$$

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

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

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

2 MECANISMES D'EMISSION

Une surface opaque (*Figure III.3*) de température T, aire S, normale (Ω_n) et absorptance $\alpha_a(\lambda,T,\Omega_v)$ (*i.e.*, % du rayonnement intercepté qui est absorbé) émet dans le cône (Ω_v,$\Delta\Omega_v$) la puissance :

$$W_e(\lambda,T,\Omega_v) = \alpha_a(\lambda,T,\Omega_v).L_B(\lambda,T).S.\cos(\Psi_{vn}).\Delta\Omega_v \qquad \text{où } \cos(\Psi_{vn}) = |\Omega_v.\Omega_n| \tag{III-15}$$

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

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

$$\varepsilon_d(\lambda,T,\Omega_v) = \alpha_a(\lambda,T,\Omega_v) \tag{III-16}$$

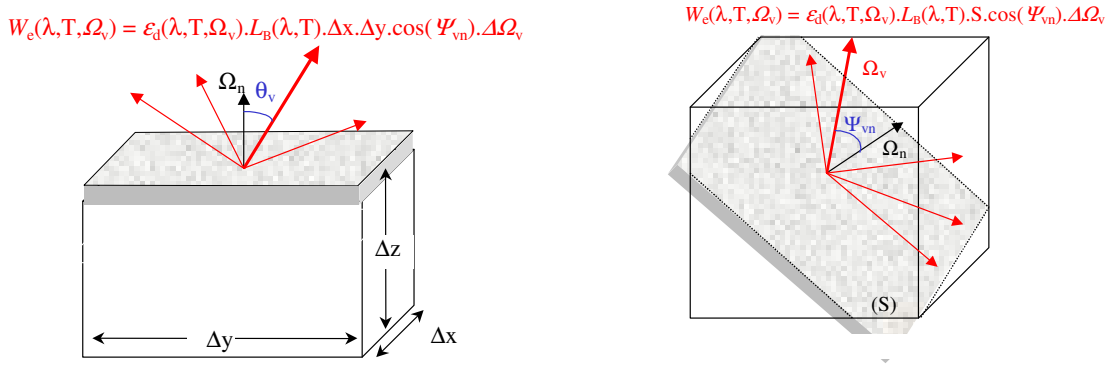


Figure III.3 : Surface de normale Ω_n vue selon la direction $\Omega_v(\theta_v,\phi_v)$.

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

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

L'émissivité s'écrit donc : $$\varepsilon_d(\lambda,T,\Omega_v) = 1 - \rho_{hd}(\lambda,T,\Omega_v) \tag{III-17}$$

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

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

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

$$\varepsilon_d(\lambda,T) = 1 - \{\rho_{lamb};\sigma_\rho\} \tag{III-18}$$

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

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

$$\varepsilon_d(\lambda,T,\Omega_v) = 1 - \{\rho_{lamb} + \rho_{spe,dh}(\Omega_v)\} \tag{III-19}$$

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

$$\varepsilon_d(\lambda,T,\Omega_v) = 1 - \{<\rho> + \rho_{spe,dh}(\Omega_v)\} \tag{III-20}$$

Si "$b_2 = c_2 = g_2 = 0$", on a : $$\varepsilon_d(\lambda,T,\Omega_v) = (1-\omega)^{0.5}.\frac{1+2.\cos\Psi_{vn}}{1+2(1-\omega)^{0.5}.\cos\Psi_{vn}} - \rho_{spe,dh}(\Omega_v) \tag{III-21}$$

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

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

3 POINT ORIGINE DU RAYONNEMENT DIFFUSE OU EMIS

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

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

1) Détermination s'il existe ou non un point d'intersection (M) entre le rayon incident (*i.e.*, demi droite repérée par $W_1(\Omega_s)$, $W_2(\Omega_s)$, $W_3(\Omega_s)$, $W_4(\Omega_s)$ dans la *Figure III.4*) sur la cellule et le plan {"3 points + vecteur normal Ω_n"} de toute figure comprise pour tout ou partie dans la cellule.

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

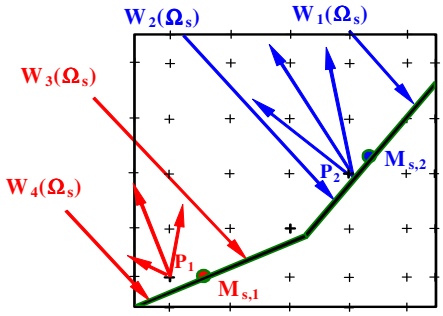


Figure III.4 : Interception de 4 rayons incidents par 2 figures. W_1 et W_2 sont interceptés par la figure 2 et W_3 et W_4 par la figure 1. Les points d'émission effectifs résultants sont P_2 et P_1.

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

1) Pour chaque figure interceptrice, détermination du point d'émission "exact" par une méthode barycentrique similaire à celle utilisée pour les cellules feuilles : quand un rayon intersecte une figure dans une cellule, le nouveau point d'émission "exact" de cette figure est le barycentre "énergétique" de ce point d'intersection et du point d'émission "exact" avant cette intersection (*e.g.*, $M_{s,1}$ et $M_{s,2}$ dans la *Figure III.4*). Ce calcul tient compte de l'énergie véhiculée par le rayon. Cette valeur n'est jamais réinitialisée au cours des différentes diffusions. Etant un barycentre, tout point d'émission est donc toujours sur la figure.

2) Détermination du point d'origine effectif (*e.g.* P_1 et P_2 dans la *Figure III.4*) parmi les $(N_{sc}^3 + 6N_{sf}^2)$ points qui échantillonnent la cellule. Le centre de la sous cellule (appelé "sous centre") qui contient (M_{si}) est tout d'abord déterminé par seuillage des coordonnées de (M_{si}). Tout point P_i doit être le plus proche possible de (M_{si}) et vérifier les 2 conditions suivantes :
   a) (P_i) est à l'extérieur du volume délimité par la figure plane émettrice.
   b) aucune figure ne se trouve entre (P_i) et (M_{si}).

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

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

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

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

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

4 SUIVI DE RAYON DIFFUSE OU EMIS

Les cellules de type "Opaque_plat" (*e.g. Sol*, *Eau*,...) n'émettent que depuis leur face supérieure (*Figure III.1a*), à priori depuis le centre de cette face. L'image "horizontale". Si un motif (*e.g.* mur, tronc,...) surmonte le centre de la face supérieure de ces cellules, le point origine est décalé hors du motif, sur la face supérieure de la cellule, du côté où le motif intercepte le plus d'énergie.

Dans une cellule contenant une figure, l'interaction "rayon-matière" survient sur la portion de la figure dans la cellule. Le trajet d'un rayon issu d'un point d'émission effectif (P_i) de la cellule comprend 2 parties (*i.e.*, 2 listes chaînées pré-calculées) : trajet jusqu'au point d'intersection (Q_i) du rayon avec le plan horizontal (inférieur ou supérieur) qui borne la cellule qui inclue le sous centre, puis trajet depuis le point (E_i) du plan le plus proche de (Q_i) (*Figure II.11*). Trois difficultés (*Figure III.5*) apparaissent souvent :

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

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

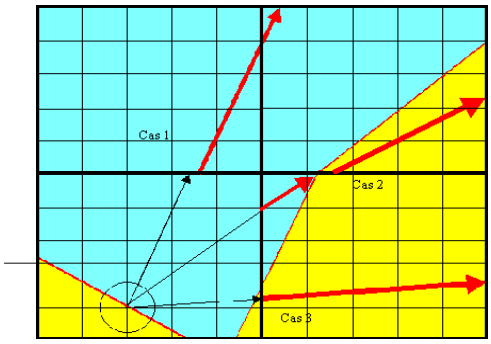


Figure III.5: Illustration de 3 difficultés associées au suivi de rayons depuis la cellule origine. Trajets précalculés dans la cellule origine (noir) et dans les cellules voisines (rouge).

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

Diverses difficultés ont surgi du fait de la modélisation du transfert radiatif dans un milieu simulé avec des figures opaques. La Figure III.6 illustre un problème du à la discontinuité de l'éclairement de surfaces planes coplanaires adjacentes au sein d'une même cellule. Cette discontinuité est due à la discrétisation de l'éclairement. Il a été résolu en affectant à toutes les surfaces le même éclairement à l'aide d'une moyenne des éclairements pondérée par les surfaces des figures concernées. Un problème équivalent a été résolu pour ce qui est de l'attribution des températures à des surfaces coplanaires d'une même cellule.

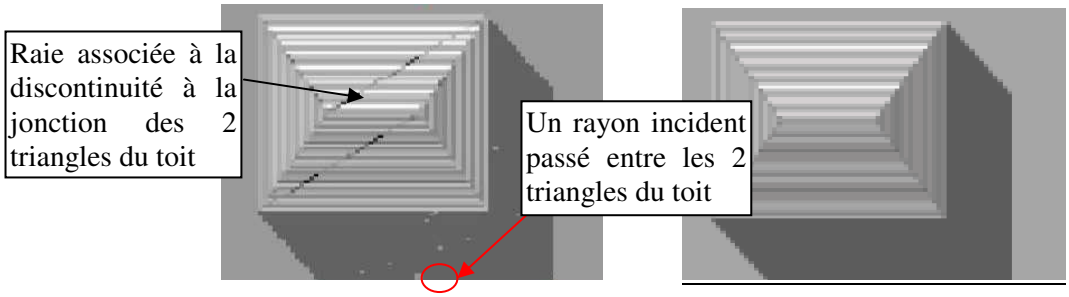


Figure III.6 : Problème du à la réflectance de figures planes coplanaires adjacentes dans une même cellule

IV DIFFUSION ET ÉMISSION DES MILIEUX TURBIDES ET MIXTES

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

bases de données : propriétés optiques spectrales des sols et de la végétation (*cf.* 1) et propriétés structurelles et optiques de l'atmosphère (*cf.* 3). Les paragraphes qui suivent décrivent le calcul de certaines quantités spectrales foliaires (*e.g.*, transmittance par unité de densité volumique foliaire et diffusion volumique foliaire).

1 TRANSMISSION ET INTERCEPTION DU RAYONNEMENT

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

$$\alpha(i,\Omega_n) = u_f(i).G(j,\Omega_n) \qquad \text{(IV-1)}$$

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

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

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

$$T(\Delta l_i,\Omega_n) = \exp[-G(j,\Omega_n).u_f(i).\Delta l_i] \qquad \text{(IV-3)}$$

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

$$\frac{1}{2\pi}.\int_0^{2\pi^+} d\phi_f \int_0^1 g_f(z,\Omega_f).d\mu_f = 1 \qquad \text{(IV-4)}$$

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

$$g_f^*(\theta_f) = \langle g_f(z,\Omega_f)\rangle_{\Phi_f} = \int_{2\pi} \frac{g_f(\theta_f,\phi_f)}{2\pi}\, d\Phi_f\ (rad^{-1}) = g_f(\theta_f).\sin(\theta_f) \qquad \left(\int_0^{\frac{\pi}{2}} g_f^*(\theta_f).d\theta_f = 1\right) \qquad \text{(IV-5)}$$

L'angle foliaire moyen (Average Leaf Angle) est : $$ALA = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \theta_f.g_f^*(\theta_f).d\theta_f \qquad \text{(IV-6)}$$

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

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

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

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

$$g_f(\theta_f) = A.\cos^m[\frac{\pi}{2}\frac{\theta - \theta_o}{\theta_2 - \theta_o}] \qquad \text{(IV-7)}$$

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

$$\overset{\text{trigo.}}{g_f(\theta_f)} = \frac{2}{\pi}\frac{a+b.\cos(2c.\theta_f) + d.\sin\theta_f}{\sin\theta_f} \qquad \text{(IV-8)}$$

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

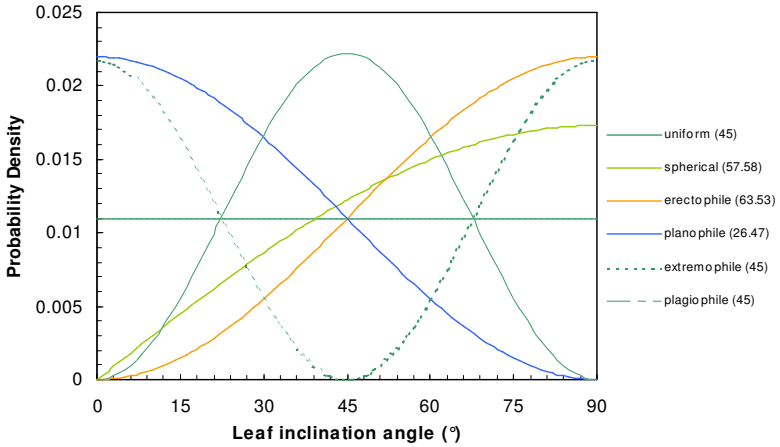
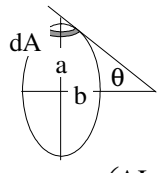


Figure IV.1: 6 LAD calculés à partir des fonctions trigonométriques (Bunnick, 1978). Angle foliaire moyen ALA (°) entre parenthèse.

Le LAD est un paramètre majeur, car son impact sur la réflectance des couverts homogènes équivaut à celui du LAI (Bacour, 2002). Lors de l'inversion d'un modèle de réflectance, le LAD ne devrait donc pas être fixé, sauf s'il est connu. Les LAD paramétriques ci-dessus ne sont donc pas adaptés au mode inverse, sauf si le type de LAD est connu (Jacquemoud *et al.*, 2001). Ce problème est résolu ici avec 2 fonctions qui simulent tout LAD avec un nombre réduit de paramètres (Figure IV.2, Tableau IV.1).

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

$$g_f(\theta_f) = \frac{dA}{\text{Aire de l'ellipsoïde}} = \frac{2\chi^3}{\Lambda(\cos^2\theta_f + \chi^2\sin^2\theta_f)^2} \quad \text{où } \theta_f \in [0\ \frac{\pi}{2}] \qquad \text{(IV-9)}$$



- χ : Rapport des demi axe horizontal *b* et vertical *a* de l'ellipsoïde. $\chi = -3 + \left(\frac{ALA}{9.65}\right)^{-1/1.65}$ avec *ALA* en radians. χ impose la forme de la distribution (*e.g.*, LAD sphérique *i.e.*, ALA $\approx 56.137°$ si $\chi = 1$, LAD horizontal si $\chi \to \infty$, et feuilles strictement verticales si $\chi \to 0$)

- Λ : surface de l'ellipsoïde divisée par $2\pi b^2$. Elle est approchée par : $\Lambda = \chi + 1.774.(\chi + 1.182)^{-0.733}$

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

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

$$g_f(\theta_f) = \frac{B_g}{\sqrt{1-\varepsilon^2\cos^2(\theta_f - \theta_m)}} \qquad \text{(IV-10)}$$

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

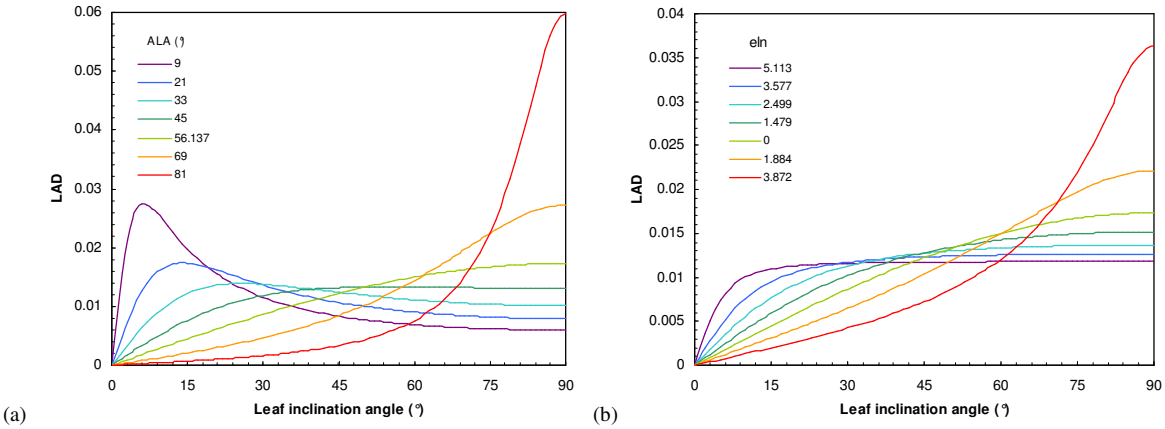


Figure IV.2 : LAD $g_f(\theta_f)$ ellipsoïdal (a) et elliptique (b) pour 7 angles foliaires moyens ALA (°).

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

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

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

$$T(\Delta l_i,\Omega_n) = [T(j,\Omega_n)]^{uf(i).\Delta li} \qquad \text{(IV-11)}$$

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

$$W_{trans}(\Delta l_i,\Omega_n) = T(\Delta l_i,\Omega_n).W_{in}(0,\Omega_n) \quad \text{(IV-12)}$$

L'énergie interceptée sur ce trajet $(\Delta l_i,\Omega_n)$ est : $W_{int}(\Delta l_i,\Omega_n) = [1 - T(\Delta l_i,\Omega_n)].W_{in}(0,\Omega_n)$ (IV-13)

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

Le module *Phase* modélise la dépendance angulaire de LAI_E dans (IV-3) en pondérant $G(j,\theta_n)$ par une sigmoïde à quatre paramètres :

$$\Omega_E(j,\theta_n) = \frac{\Omega_{E,max}(j)}{1+\exp[-a(j).(\theta_n - b(j))]} + \Omega_{E,min}(j) \quad \text{(IV-14)}$$

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

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

2 DIFFUSION VOLUMIQUE D'UNE CELLULE TURBIDE

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

$$\frac{P(\Omega_s,\Omega_v)}{4\pi} = \frac{\int_{2\pi} \frac{g_f(j,\Omega_f)}{2\pi}.|\Omega_s.\Omega_f|.f(j,\Omega_f,\Omega_s\rightarrow\Omega_v).d\Omega_f}{G(j,\Omega_s)} \quad \text{(IV-15)}$$

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

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

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

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

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

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

$$f_d(j,\Omega_s \rightarrow \Omega_v,\Omega_f) = \begin{cases} \frac{1}{\pi}.\rho_f(\Psi_{fs}).|\Omega_f.\Omega_v| & (\Omega_s.\Omega_f).(\Omega_f.\Omega_v) < 0 \\ \frac{1}{\pi}.\tau_f(\Psi_{fs}).|\Omega_f.\Omega_v| & (\Omega_s.\Omega_f).(\Omega_f.\Omega_v) > 0 \end{cases} \quad \text{(IV-16)}$$

$$\text{où} \quad \int_{4\pi} f_d(j,\Omega_s \rightarrow \Omega_v,\Omega_f).d\Omega_v = \rho_f(\Psi_{fs}) + \tau_f(\Psi_{fs}) \quad \text{(IV-17)}$$

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

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

$$f_s(j,\Omega_s \rightarrow \Omega_v,\Omega_s) = K_f(j,\Psi_{fs}).R_s^2(n_j,\Psi_{fs}).\delta(\Omega_s,\Omega_v^*) \quad \text{(IV-18)}$$

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

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

$$f_p(j,\Omega_s \rightarrow \Omega_v,\Omega_s) = K_f(j,\Psi_{fs}).R_p^2(n_j,\Psi_{fs}).\delta(\Omega_s,\Omega_v^*) \quad \text{(IV-19)}$$

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

- Flux diffus : $\mathcal{W}(\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v) = W_{int}(\Delta l_i\ \Omega_s).T_d(j,\Omega_s,\Omega_v)$ (IV-20)

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

- Flux spéculaire : $\mathcal{W}_s(\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v) = W_{int}(\Delta l_i\ \Omega_s).T_s(j,\Omega_s,\Omega_v)$ (IV-21)

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

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

◆ Flux polarisé : $\mathcal{W}_p(\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v) = W_{int}(\Delta l_i\ \Omega_s).T_p(j,\Omega_s,\Omega_v)$ (IV-22)

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

3 DIFFUSION D'UNE CELLULE TURBIDE

• Diffusion d'ordre 1 (k=1)

Soit le vecteur source $[W(l,\Omega_s), W_{nf}(l,\Omega_s), W_p(l,\Omega_s)]$ incident selon (Ω_s) en (A) sur la face *f* de la cellule turbide *i*, avec une seule espèce foliaire *j* (*Figure IV.3*). Tout point sur le trajet Δl_i du rayon dans la cellule est repéré par $l\in[0\ \Delta l_i]$, depuis (A). Ici : f=2. On note : $nf_{in}(\Omega_s)=\dfrac{W_{nf}(0,\Omega_s)}{W(0,\Omega_s)}$, avec $nf_{in}(\Omega_s)=1$ pour k=1.

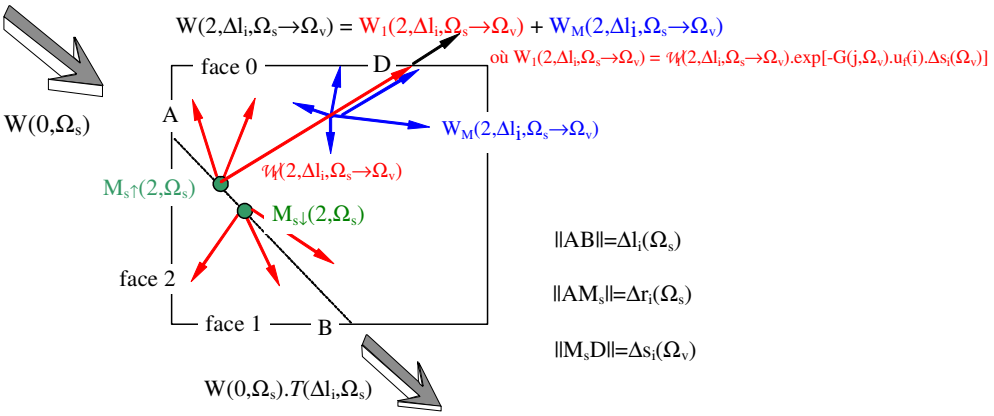


Figure IV.3: Mécanismes de diffusion simple et multiple au sein d'une cellule turbide.

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

$$\mathcal{W}_1(f,\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v) = T(j,\Omega_s,\Omega_v).W_{int}(f,\Omega_s) = \mathcal{W}_{d1}(f,\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v) + \mathcal{W}_{s1}(f,\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v) \quad \text{(IV-23)}$$

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

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

La diffusion d'ordre 1 totale est :

$$W_1(f,\Omega_s) = \int_{4\pi}\mathcal{W}_1(f,\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v) = \sum_{v=1}^{N_{dir}}[\mathcal{W}_{d1}(f,\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v) + \mathcal{W}_{s1}(f,\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)] \quad \text{(IV-24)}$$

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

$$W_1(f,\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v) = \mathcal{W}_1(f,\Delta l_i,\Omega_s\rightarrow\Omega_v).\exp[-G(j,\Omega_v).u_f(i).\Delta s_i(\Omega_v)] \qquad \text{(IV-25)}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\alpha_e(\Omega_s,\Omega_v,\delta s_i) = u_f(i).G(j,\Omega_v).\{1-\sqrt{\frac{G(j,\Omega_s).}{G(j,\Omega_v).|\mu_s|.\mu_v}}.\frac{s_f(j,\Omega_v)}{\Delta(\Omega_s,\Omega_v)}.[1-\exp(-\frac{\Delta(\Omega_s,\Omega_v)}{s_f}.\delta s_i(\Omega_v).\mu_v)]\} \qquad \text{(IV-26)}$$

$$\text{où :}\quad \Delta(\Omega_s,\Omega_v) = \sqrt{\frac{1}{\mu_v^2}+\frac{1}{\mu_s^2}-\frac{2.\cos g}{|\mu_s.\mu_v|}} \qquad \text{et } \cos g = -\vec{\Omega}_s.\vec{\Omega}_v\ (\theta_s \in\ ]\frac{\pi}{2};\pi]) \qquad \text{(IV-27)}$$

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

$$s_f(j,\Omega_v) = \frac{\pi.d_f(j).G(j,\Omega_v)}{4.\mu_v.IIs_f(j,\Omega_f)} \qquad \text{avec} \quad IIs_f(j,\Omega_f) = \int_{2\pi}\int_{\frac{\pi}{2}} \frac{\overset{*}{g}_f(j,\Omega_f)}{2\pi}\frac{d\theta_f.d\phi_f}{\sqrt{1+tg^2\theta_f.\sin^2\phi_f}} \qquad \text{(IV-28)}$$

où d_f est le diamètre des feuilles et $\frac{G(j,\Omega_v)}{\mu_v}$ la fraction de surface foliaire d'interception efficace normalisée selon la direction de visée Ω_v. En supposant les feuilles horizontales et un rôle symétrique des directions Ω_s et Ω_v, Kuusk (1991) suggère que le niveau de corrélation au niveau z varie en $e^{-\Delta(\Omega_s,\Omega_v).z/s_f}$ où s_f a un impact supérieur à la forme de la fonction de corrélation. Par contre, pour Bréon *et al.* (2002) la forme du *hot spot* d'un couvert homogène sphérique semble mieux décrite par l'angle de phase que par la fonction $\Delta(\Omega_s,\Omega_v)$. De plus, hormis le cas "LAD horizontal", la distance "Ω_s - Ω_v" leur paraît devoir être calculée perpendiculairement à Ω_s et Ω_v, indépendamment de s_f, alors que Kuusk (1991) a introduit s_f pour se ramener à une distribution horizontale ($s_f(_{horiz.},\Omega_v \approx \Omega_s) = d_f(j).\pi/4$). Le Tableau IV.2 donne $IIs_f^{trigo.}(j,\Omega_f)$, déduit de $g_f^{trigo.}(j,\theta_f)$, pour le LAD sphérique et les 5 LADs de DeWit (1965).

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

Tableau IV.2: Pré calcul de la double intégrale pour les 6 LAD prédéfinis.

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

$$\left(IIs_f^{ellipsoidal}(j,\Omega_f)\right)^{-1} \approx 1+0.357\left(\frac{ALA(j)}{97\text{-}ALA(j)}\right)^{1.252} \qquad \text{(IV-29)}$$

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

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

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

$$\mathcal{W}_{1,int}(f,\Delta l_i,\Omega_s) = \sum_{v=1}^{N_{dir}} \{[\mathcal{W}_{d1}(f,\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v) - W_{d1}(f,\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v)] + [\mathcal{W}_{s1}(f,\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v) - W_{s1}(f,\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v)]\} \qquad \text{(IV-30)}$$

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

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

$$\Rightarrow\ W_M(f,\Delta l_i,\Omega_s) \approx \left[\frac{\omega_j.<T_i>}{1 - \omega_j.[1 - <T_i>]}\right].\mathcal{W}_{1,int}(f,\Delta l_i,\Omega_s) \qquad \text{(IV-31)}$$

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

$$W_{sM}(f,\Delta l_i,\Omega_s) \approx [\frac{\omega_{sj}.<T_i>}{1 - \omega_{sj}.[1 - <T_i>]}].\mathcal{W}_{1,int}(f,\Delta l_i,\Omega_s) \qquad \text{(IV-32)}$$

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

$$W_{dM}(f,\Delta l_i,\Omega_s) = W_M(f,\Delta l_i,\Omega_s) - W_{sM}(f,\Delta l_i,\Omega_s) \approx \{\frac{\omega_j.<T_i>}{1 - \omega_j.[1 - <T_i>]} - \frac{\omega_{sj}.<T_i>}{1 - \omega_{sj}.[1 - <T_i>]}\}.\mathcal{W}_{1,int}(f,\Delta l_i,\Omega_s) \qquad \text{(IV-33)}$$

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

$$<T_i> = \int_{4\pi} e^{-G(j,\Omega).uf(i).\Delta mi(\Omega)} = \frac{1}{4\pi} \sum_{v=1}^{N_{dir}} [T(j,\Omega_v)]^{uf(i).\Delta mi(\Omega v)}.\Delta\Omega_v \qquad \text{(IV-34)}$$

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

$$W_M(f,\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v) = W_M(f,\Delta l_i,\Omega_s).\frac{T(\Delta s_i,\Omega_v).\sum_{s=1}^{N_{dir}} \int_{2\pi} |\Omega_s.\Omega_f|.\frac{g_f(j,\Omega_f)}{2\pi}.f(j,\Omega_s \rightarrow \Omega_v,\Omega_f).d\Omega_f.\Delta\Omega_s.\Delta\Omega_v}{\sum_{v=1}^{N_{dir}} T(\Delta s_i,\Omega_v).\sum_{s=1}^{N_{dir}} \int_{2\pi} |\Omega_s.\Omega_f|.\frac{g_f(j,\Omega_f)}{2\pi}.f(j,\Omega_s \rightarrow \Omega_v,\Omega_f).d\Omega_f.\Delta\Omega_s.\Delta\Omega_v} \qquad \text{(IV-35)}$$

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

$$W_M(f,\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v) = W_M(f,\Delta l_i,\Omega_s).\frac{T(\Delta s_i,\Omega_v).TG(j,\Omega_v)}{\sum_{v=1}^{N_{dir}} T(\Delta s_i,\Omega_v).TG(j,\Omega_v)] } \approx W_M(f,\Delta l_i,\Omega_s).\frac{T(\Delta s_i,\Omega_v).TG(j,\Omega_v)}{<T_i>.\sum_{v=1}^{N_{dir}} TG(j,\Omega_v)] } \qquad \text{(IV-36)}$$

$$\Rightarrow \qquad W_{sM}(f,\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v) = \frac{T(\Delta s_i,\Omega_v)}{<T_i>}.s_M(j,\Omega_v).W_{sM}(f,\Delta l_i,\Omega_s) \qquad \text{(IV-37)}$$

$$\Rightarrow \qquad W_{nf,M}(f,\Delta l_i,\Omega_s \rightarrow \Omega_v) = nf_{in}(\Omega_s).\frac{\omega_{sj}}{\omega_j}.\frac{T(\Delta s_i,\Omega_v)}{<T_i>}.s_M(j,\Omega_v).W_{sM}(f,\Delta l_i,\Omega_s) \qquad \text{(IV-38)}$$

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

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

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

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

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

$$[\sum_{o=1}^{\vartheta(f)} \{W_1(f,\Delta l_i(o),\Omega_s\rightarrow\Omega_v) + W_M(f,\Delta l_i(o),\Omega_s\rightarrow\Omega_v)\}, W_{nf}(f,\Omega_s\rightarrow\Omega_v), W_p(f,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)] \qquad \text{(IV-39)}$$

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

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

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

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

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

- **Diffusion (k>1)**

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

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

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

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

$$W_{int}(f,\Omega_{sect,r}) = \Sigma_{\Omega_s} W_{int}(f,\Omega_s) \qquad r\in[1\ N_{sect}] \qquad \text{(IV-40)}$$

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

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

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

$$\mathcal{W}_1(f,\Omega_v)=\sum_{r=1}^{N_{sect}}[T(\Omega_{sect,r}\rightarrow\Omega_v).\sum_{n(o)\in\Delta\Omega sect,r}W_{int}(f,\Omega_{n(o)})] \text{ où } T(\Omega_{sect,r}\rightarrow\Omega_v)=\frac{\sum_{n(o)\in\Delta\Omega sect,r}T(\Omega_{n(o)},\Omega_v)}{\sum_{n(o)\in\Delta\Omega sect,r}\Delta\Omega_{n(o)}} \quad \text{(IV-41)}$$

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

$$[W_1(f,\Omega_v) + W_M(f,\Omega_v),\ W_{nf}(f,\Omega_v),\ 0] = [\sum_{r=1}^{N_{sect}} W_{scatt}(f,\Omega_{sect,r}\rightarrow\Omega_v),\ \sum_{r=1}^{N_{sect}} W_{nf}(f,\Omega_{sect,r}\rightarrow\Omega_v),\ 0]$$

Le calcul de $W_M(f,\Omega_v)$ et l'atténuation de $\mathcal{W}_1(f,\Omega_v)$ font que ce n'est pas une simple somme sur les secteurs.

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

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

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

$$x_{f,o+1,k}=\frac{x_{f,o,k}.W_{int}(f,o,k)+x.W_{int}(f)}{W_{int}(f,o,k)+W_{int}(f)},\quad y_{f,o+1,k}=\frac{y_{f,o,k}.W_{int}(f,o,k)+y.W_{int}(f)}{W_{int}(f,o,k)+W_{int}(f)},\quad z_{f,o+1,k}=\frac{z_{f,o,k}.W_{int}(f,o,k)+z.W_{int}(f)}{W_{int}(f,o,k)+W_{int}(f)} \quad \text{(IV-42)}$$

- **Trajet du flux diffusé hors de la cellule diffusante** (*Figure IV.5*).

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

Iteration 1

$W_{scatt}(f,\Omega_s\rightarrow\Omega_v)=\sum_{o=1}^{\vartheta(f)}\{W_1(f,\Delta l_i(o),\Omega_s\rightarrow\Omega_v)+W_M(f,\Delta l_i(o),\Omega_s\rightarrow\Omega_v)\}$ est le flux montant qui sort de la cellule, depuis $M_{s\uparrow}(f)$. A partir du plan $\mathcal{P}$, le trajet du flux a pour origine le centre $\mathcal{D}_{sf,h}$ de la sous face qui contient $D_{f,h}$. La diffusion d'une cellule selon une direction donnée (Ω_v) est donc simulée par le suivi de 3 flux au plus (le flux solaire direct intersecte 3 faces au plus).

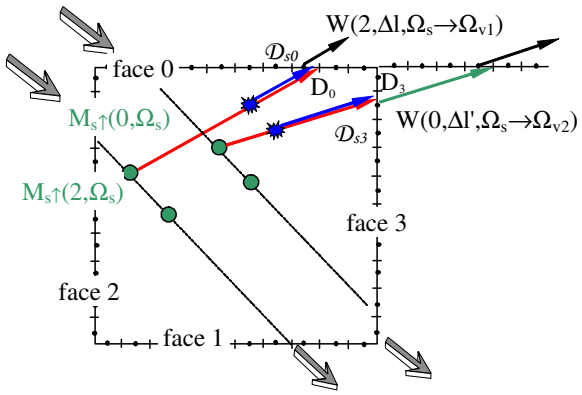


Figure IV.4:

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

Iteration >1

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

$$W_{scatt}(\Omega_v) = \sum_{f=1}^{6} \Sigma_r W_1^*(f,\Omega_{sect,r}\rightarrow\Omega_v) + \sum_{f=1}^{6} \Sigma_r W_M^*(f,\Omega_{sect,r}\rightarrow\Omega_v) \qquad \text{(IV-43)}$$

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

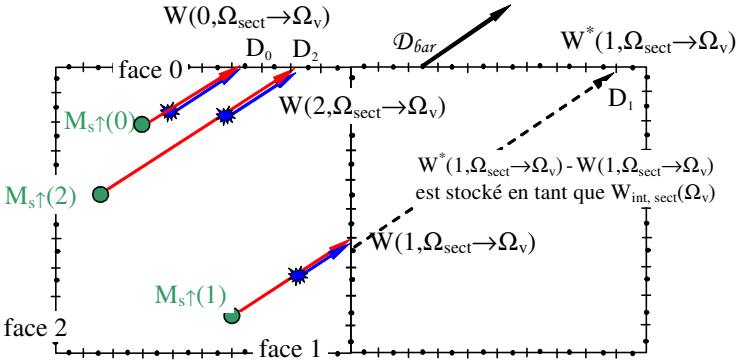


Figure IV.5:

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

4 DIFFUSION D'UNE CELLULE MIXTE

Une cellule mixte peut contenir :

- N_{surf} différentes surfaces opaques représentées par leurs propriétés $\{\rho_{surf,u}[\Omega_s,\Omega_v)],...\}$et géométriques $M_{s,surf,u}$ (*i.e.* barycentre énergétique) où u ∈ [1 N_{surf}] ;
- N_{turb} différents milieux turbides $\{g_t(\Omega_f), u_{f,t}, \rho_{ft}, \tau_{f,t},...\}$ où t ∈ [1 N_{turb}]. Le comportement radiatif de ces N_{turb} milieux est simulé comme celui d'un milieu turbide dont les paramètres "moyens" sont :
  - Une densité volumique $u_f=\Sigma_t u_{f,t}$ et un facteur géométrique $G(\Omega)=\frac{\Sigma_t G_t(\Omega).u_{f,t}}{u_f}$ (IV-44)
  - Une fonction de phase : $T(\Omega_s,\Omega_v)=\frac{\Sigma_t u_{f,t}(i).T_t(\Omega_s,\Omega_v)}{\Sigma_t u_{f,t}(i)}$ (IV-45)
  - Une surface apparente des feuilles (IV-28) : $s_f(\Omega)=\frac{\Sigma_t s_{f,t}(\Omega).G_t(\Omega).u_{f,t}}{\Sigma_t G_t(\Omega).u_{f,t}}$ (IV-46)
  - Une altitude des barycentres $z_{Ms\uparrow}$ et ($z_{Ms\downarrow}$) calculées pour $\theta_s \neq \theta_v$ avec :

$$z_{Ms\,\uparrow_{(\downarrow)}}(\Omega_v) = -\frac{|\mu_v|}{{}_{(+)}G(\Omega_v).u_f} \cdot \ln\left[\frac{\frac{G(\Omega_s).|\mu_v|}{{}_{(-)}G(\Omega_v).|\mu_s| + G(\Omega_s).|\mu_v|} \cdot \left[1 - \exp\left[-u_f.\Delta z.\left(\frac{G(\Omega_v)}{|\mu_v|} \underset{(-)}{+} \frac{G(\Omega_s)}{|\mu_s|}\right)\right]\right]}{\left[1 - \exp\left[-G(\Omega_s).u_f.\frac{\Delta z}{|\mu_s|}\right]\right]}\right] \qquad \text{(IV-47)}$$

Pour la direction solaire ($\theta_s=\theta_v$) : $$z_{Ms}(\Omega_v) = \frac{|\mu_s|}{G(\Omega_s).u_f}.\ln\left[\frac{G(\Omega_s).u_f.\frac{\Delta z}{|\mu_s|}}{\left[1 - \exp\left[-G(\Omega_s).u_f.\frac{\Delta z}{|\mu_s|}\right]\right]}\right] \qquad \text{(IV-48)}$$

L'interaction entre un rayon et une cellule mixte est modélisée en considérant les 2 seuls cas possibles (Figure IV.7 et Figure IV.6) : le rayon incident sur la face *f* de la cellule traverse celle-ci en interceptant ou non une surface opaque. Le Tableau IV.3 présente les algorithmes associés.

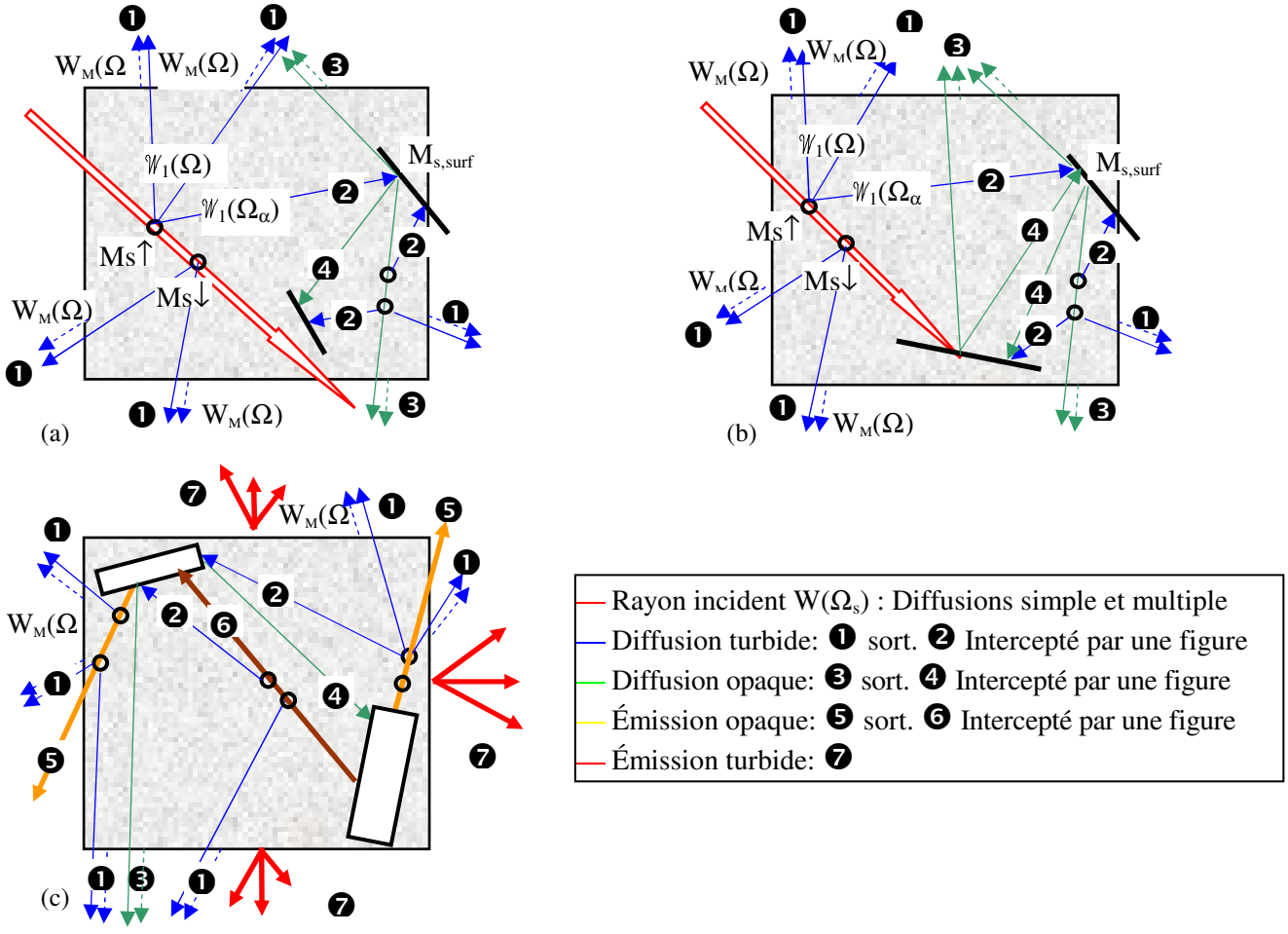


Figure IV.6 : Transfert radiatif dans une cellule mixte. Un rayon incident traverse la cellule sans (a) et avec (b) interception par une surface opaque (mode R ou itération k≠2 en mode T). c) Itération k=2 en mode (T).

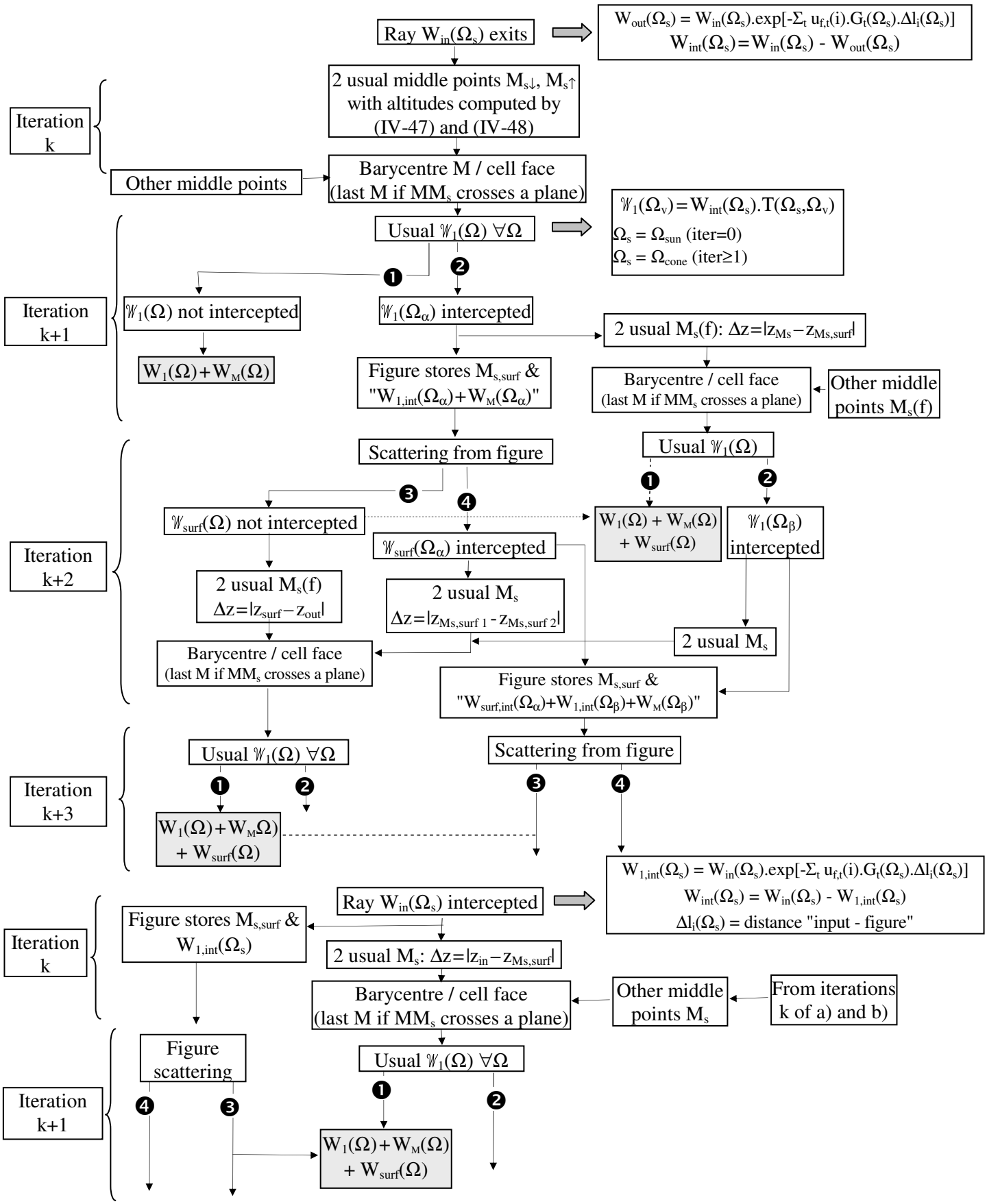


Figure IV.7 : Transfert radiatif dans une cellule mixte (turbide + opaque) en mode (R).

1) ***Un rayon traverse la cellule sans être intercepté par une surface opaque*** (Figure IV.6.a)

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

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

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

  ❷ *Avec interception* : $W_{1,int}(\Omega) + W_M(\Omega)$ intercepté par la surface. Calcul de nouveaux $M_s\uparrow$(f) et $M_s\downarrow$(f) en remplaçant dans (IV-46) et (IV-47) Δz par $|z_{Ms}(f) - z_{Ms,surf}|$. En l'absence de surface interceptrice *f* est la face de sortie de la cellule qu'emprunte le rayon. Puis calcul des nouveaux barycentres.

- **Itération k+2** :

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

  ❸ *Sans interception* : - Calcul de $M_s\uparrow$(f) et $M_s\downarrow$(f) avec (IV-46) et (IV-47) et $\Delta z=|z_{Ms,surf}-z_{out}|$ où z_{out} = altitude de sortie du rayon, puis calcul des nouveaux barycentres.
  - $W_{surf}(\Omega)$ quitte la cellule.

  ❹ *Avec interception* : $W_{surf,int}(\Omega)$ et $W_1(\Omega) + W_M(\Omega)$ (issus des $M_s\uparrow$ et $M_s\downarrow$) interceptés par la figure. Calcul de nouveaux $M_s\uparrow$(f) et $M_s\downarrow$(f) avec (IV-46) et (IV-47) et $\Delta z = |z_{Ms,surf1} - z_{Ms,surf2}|$. Puis nouveaux barycentres.

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

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

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

2) ***Un rayon traverse la cellule et est intercepté par une surface opaque*** (Figure IV.6.b)

- **Itération k** : calcul de $W_{surf,int}(\Omega)$, $M_s\uparrow(f)$ et $M_s\downarrow(f)$ avec (IV-46) et (IV-47) et $\Delta z = |z_{in} - z_{Ms,surf}|$ où z_{in} = altitude d'entrée du rayon dans la cellule, puis nouveaux barycentres $M_s\uparrow(f)$ et $M_s\downarrow(f)$.
- **Itération k+1** : comme l'itération k+1 du cas 1.

Tableau IV.3 : Les 2 algorithmes de gestion du transfert radiatif dans une cellule "mixte". Le rayon incident sur la cellule traverse celle-ci sans et avec interception par une surface opaque.

5 PRINCIPES DE L'EMISSION THERMIQUE

- **Loi de Planck**

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

$$dL_B(\lambda,T) = \frac{2 \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot \left[\exp\left(\frac{h \cdot c}{k \cdot \lambda \cdot T} \right) - 1 \right]} \cdot d\lambda \qquad \text{(IV-49)}$$

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

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

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

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

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

$$M_B(\lambda,T) = \int_{2\pi} L_B(\lambda,T).|\Omega_v.\Omega_n|.d\Omega_v = \pi.L_B(\lambda,T) \qquad \text{(IV-50)}$$

La majeure partie de $M_B(\lambda,T)$ provient sur intervalle spectral relativement étroit centré sur λ_{max} (μm) correspondant au maximum de (IV-49) et donnée par la loi de Wien :

$$\lambda_{max} = \frac{2897.8}{T} \qquad \text{(IV-51)}$$

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

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

La luminance totale associée s'écrit :

$$L_B(\lambda) = \int_0^{\infty} L_B(\lambda,T).d\lambda = \frac{M_B(T)}{\pi} \qquad \text{(IV-52)}$$

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

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

$$\varepsilon_d(\lambda,T,\Omega_v) = \frac{q_a(\lambda,T,\Omega_v)}{q_e(\lambda,T,\Omega_v)} \qquad \text{(IV-53)}$$

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

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

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

$$\omega(\lambda) = \frac{\alpha_d(\lambda)}{\alpha_a(\lambda)+\alpha_d(\lambda)} \quad \text{et} \quad \varepsilon(\lambda) = \frac{\alpha_a(\lambda)}{\alpha_a(\lambda)+\alpha_d(\lambda)} \qquad \text{(IV-54)}$$

6 ÉMISSION D'UNE CELLULE TURBIDE "AIR"

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

Les cellules *Air* ont une émission volumique isotrope selon la loi de Planck, pondérée par l'émissivité $\varepsilon(\lambda) = 1 - \omega(\lambda)$. L'émission est calculée "couche par couche" à l'aide de 2 termes définis à chaque altitude : coefficient d'extinction $\alpha_e(\lambda)$ et albédo $\omega(\lambda)$ (IV-54). La densité atmosphérique étant faible, les rayons émis ont une direction qui passe par le centre de la cellule émettrice, et une origine dans le plan supérieur (direction montante) ou inférieur (direction descendante) qui borne cette cellule.

Le flux (Figure IV.8) $W_A(\lambda,T,\Omega)$ émis selon $(\Omega, \Delta\Omega)$ par une cellule de hauteur Δz à la longueur d'onde λ est le flux ($W.\mu m^{-1}$) qu'un parallélépipède horizontal de surface dS, épaisseur dz et température T émet :

$$W_A(\lambda,T,\Omega) = dS.\alpha_a(\lambda).L_B(\lambda,T).\Delta\Omega \int_0^{\Delta z} e^{-\alpha_e(\lambda).z/\cos\theta}.dz \qquad \text{(IV-55)}$$

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

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

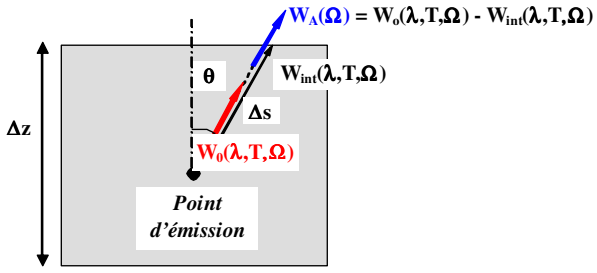


Figure IV.8:
Schéma de l'émission des cellules "air"

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

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

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

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

7 ÉMISSION D'UNE CELLULE TURBIDE DE VEGETATION

- **Approche théorique**

  Le flux d'ordre 1 $W_{1,f}(\lambda,\Omega_v)$ émis selon $(\Omega_v,\Delta\Omega_v)$ par une cellule turbide de volume V_{cell} est obtenue par intégration de l'émission de tous les éléments d_v de V_{cell}. L'intégration numérique est calculée sur les F_e ($F_e \leq 3$) faces de la cellules participant à l'émission suivant Ω_v (*i.e.* faces A et B sur la *Figure IV.9*b). En pratique, ces F_e faces sont discrétisées en IxJ surfaces élémentaires S_{ij} avec $i \in [1; I]$ et $j \in [1; J]$.

  Soit la distance du trajet optique selon Ω_v entre le centre de S_{ij} et la face de sortie f de normale Ω_n notée L_{ij} (*Figure IV.9*a), le flux d'ordre 1 émis selon Ω_v à travers l'élément de surface S_{ij} est :

$$dW_{ij}(\lambda,\Omega_v,T) = L(\lambda,T).G(\Omega_v).u_f.\Delta\Omega_v. \int_{V(f,\Omega_v)} \exp[-G(\Omega_v).u_f.\Delta l(dV)].dV$$
$$dW_{ij}(\lambda,\Omega_v,T) = L(\lambda,T).|\Omega_n.\Omega_v|.\Delta\Omega_v.\{1 - \exp[-G(\Omega_v).u_f.L_{ij}]\}.S_{ij} \quad \text{(IV-56)}$$

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

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

$$W_{1,f}(\lambda,\Omega_v) = \Sigma_{i,j}\, dW_{ij}(\Omega_v) = L(\lambda,T).|\Omega_n.\Omega_v|.\Delta\Omega_v.\Sigma_{i,j}\,\{1 - \exp[-G(\Omega_v).u_f.L_{ij}]\}.S_{ij} \quad \text{(IV-57)}$$

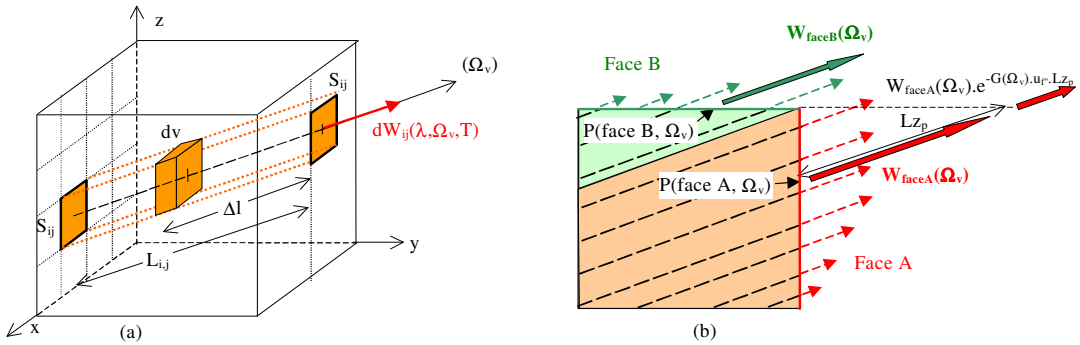


Figure IV.9 : Calcul de l'émission thermique d'une cellule turbide (T,u_f,LAD) par intégration volumique de l'émission directionnelle de dv : schéma (a) 3-D et (b) en coupe pour 2 directions Ω_v.

• Diffusions intra cellule

Une partie de l'énergie thermique émise est interceptée avant de sortir de la cellule, entraînant des diffusions d'ordre 1 et plus. Le calcul de ces diffusions n'est pas exact. Comme pour la diffusion (c.f. 3) il repose sur le calcul de l'énergie interceptée sur toutes les N_{dir} directions.

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

$$W_{int}(\lambda,\Omega_v,T) = L(\lambda,T).G(\Omega_v).u_f.\Delta\Omega_v.\left\{ V_{cell} - |\Omega_n.\Omega_v|.\sum_k \sum_{i,j} \left[\frac{1 - e^{-G(\Omega_v).u_f.L_{ij}}}{G(\Omega_v).u_f}.S_{ij}\right]\right\} \quad \text{(IV-58)}$$

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

$$W_{int}(\lambda,T) = \sum_{v=1}^{N_{dir}} W_{int}(\lambda,\Omega_v,T) \quad \text{(IV-59)}$$

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

$$W_M(\lambda,T) = W_{int}(\lambda,T).\{\omega_{j,\lambda}.<T_i> + \omega_{j,\lambda}.<T_i>.[\omega_{j,\lambda} - \omega_{j,\lambda}.<T_i>] + \omega_{j,\lambda}.<T_i>.[\omega_{j,\lambda} - \omega_{j,\lambda}.<T_i>]^2 + ...\}$$
$$\Rightarrow\ W_M(\lambda,T) \approx \left[\frac{\omega_{j,\lambda}.<T_i>}{1 - \omega_{j,\lambda}.[1 - <T_i>]}\right].W_{int}(\lambda,T) \quad \text{(IV-60)}$$

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

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

$$<T_i> = \int_{4\pi} e^{-G(j,\Omega).uf(i).\Delta mi(\Omega)} = \frac{1}{4\pi} \sum_{v=1}^{N_{dir}} [T(j,\Omega_v)]^{uf(i).\Delta mi(\Omega v)}.\Delta\Omega_v \qquad \text{(IV-61)}$$

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

$$W_M(\lambda,\Omega_v,T) = W_M(\lambda,T).\frac{TG(j,\lambda,\Omega_v).\Delta\Omega_v}{\sum_{v=1}^{N_{dir}} TG(j,\lambda,\Omega_v).\Delta\Omega_v} \qquad \text{(IV-62)}$$

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

La fonction de phase foliaire se déduit de (IV-16) avec $\tau_f(\Psi_{fs}) = 0$.

Avec F_e faces vues selon Ω_v ($F_e \leq 3$), on a : $$W_M(\lambda,\Omega_v,T) = \sum_{f=1}^{F_e} W_{M,f}(\lambda,\Omega_v,T) \qquad \text{(IV-63)}$$

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

$$W_{M,f}(\lambda,\Omega_v,T) = \frac{S_{eff}(u_f,LAD,\Omega_v,f)}{\sum_{v=1}^{F_e} S_{eff}(u_f,LAD,\Omega_v,f)}.W_M(\lambda,\Omega_v,T) = \frac{W_{1,f}(\lambda,\Omega_v,T)}{\sum_{v=1}^{F_e} W_{1,f}(\lambda,\Omega_v,T)}.W_M(\lambda,\Omega_v,T) \qquad \text{(IV-64)}$$

où d'après (IV-56) et (IV-57), $S_{eff}(u_f,LAD,\Omega_v,f) = G(\Omega_v).u_f.\int_{V(f,\Omega_v)} \exp[-G(\Omega_v).u_f.\Delta l(dV)].dV = = \frac{W_{1,f}(\lambda,\Omega_v,T)}{L(\lambda,\Omega_v,T)}$

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

$$W_{face,f}(\lambda,\Omega_v,T) = W_{1,f}(\lambda,\Omega_v,T) + W_{M,f}(\lambda,\Omega_v,T) \qquad \text{(IV-65)}$$

En fait, d'après (IV-57), (IV-58) et (IV-60), la puissance qui traverse la face *f* est le produit de la luminance de Planck $L_B(\lambda,T)$ par un facteur $H_f(u_f,LAD,\Omega_v,f)$ indépendant de *T* qui prend en compte la section efficace foliaire directionnelle ainsi que les diffusions multiples dans la cellule :

$$W_{face,f}(\lambda,\Omega_v,T) = L_B(\lambda,T).\ H_f(u_f,LAD,\Omega_v,f) \qquad \text{(IV-66)}$$

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

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

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

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

- **Prise en compte des cellules voisines**

L'origine du trajet des rayons émis $W_{face,f}$ n'est pas un centre de face, car (1) la distribution spatiale de $W_{face,f}(\Omega_v,i,j)$ n'est pas uniforme sur la face *f* et (2) les rayons $W_{face,f}(\Omega_v,i,j)$ n'ont pas les mêmes trajets dans les cellules voisines de la cellule émettrice. Le "$W_{face,f}(\Omega_v)$ transmis depuis le centre de la face *f* à travers plusieurs cellules turbides voisines" diffère donc de la somme des $W_{face,f}(\Omega_v,i,j)$ transmis. Ainsi, pour une direction montante dans le plan Oyz (*Figure IV.9*.b), avec des cellules voisines de la cellule émettrice caractérisées par un coefficient de projection $G(\Omega_v)$ et une densité volumique foliaire $u_{f''}$:

$$W_{face\ k}(\Omega_v).\exp[-G(\Omega_v).u_{f''}.\Delta l_{centre}] \neq <\Sigma_{i,j}\ W_{face\ k}(\Omega_v,i,j).\exp[-G(\Omega_v).u_{f''}.\Delta l_{i,j}] \qquad \text{(IV-67)}$$

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

La solution retenue est précise pour tout type de cellule turbide et non coûteuse en temps calcul : il est recherché le point *P* tel que l'énergie $W_{face,f}(\Omega_v)$ transmise depuis *P* à travers plusieurs cellules turbides voisines est égale à la somme des énergies $W_{face,f}(\Omega_v,i,j)$ transmises. En pratique, les coordonnées x_p et z_p de tout point origine de la face verticale droite A (*Figure IV.9*.b) sont déterminées par 2 équations :

- x_p : $W_{face,f}.\exp[-G(\Omega_v).u_{f''}.Lx_p] = \int_S\int W(x,z,\Omega_v,u_f,LAD,\lambda,T).\exp[-G(\Omega_v).u_{f''}.Lx].dS$ (IV-68)

- z_p : $W_{face,f}.\exp[-G(\Omega_v).u_{f''}.Lz_p] = \int_S\int W(x,z,\Omega_v,u_f,LAD,\lambda,T).\exp[-G(\Omega_v).u_{f''}.Lz].dS$ (IV-69)

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

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

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

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

$$F(x,z,\theta_v,\varphi_v,u_f,LAD) = \frac{W(x,z,\theta_v,\varphi_v,u_f,LAD,T,\lambda)}{L_B(\lambda,T).dS_{eff}} \qquad \text{(IV-70)}$$

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

La *Figure IV.10* donne la distribution relative F de l'énergie émise par les faces avant, droite et haut d'une cellule turbide sphérique très dense ($u_f = 5\,m^2.m^{-3}$) cubique ($\Delta X=\Delta Y=\Delta Z=0.5m$), pour la direction $(\theta_v,\varphi_v)=(60,72)$. L'origine des coordonnées est le centre des faces (x, y et $z \in$ [-0.25 0.25]). Les courbes F ont une forme générique (*Figure IV.10*.d) composée de 3 zones (A, B, C) séparées par une courbe exponentielle et caractérisées par 6 paramètres (A1, A2, A3, B1, B2, B3). F est exponentielle sur A et B

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

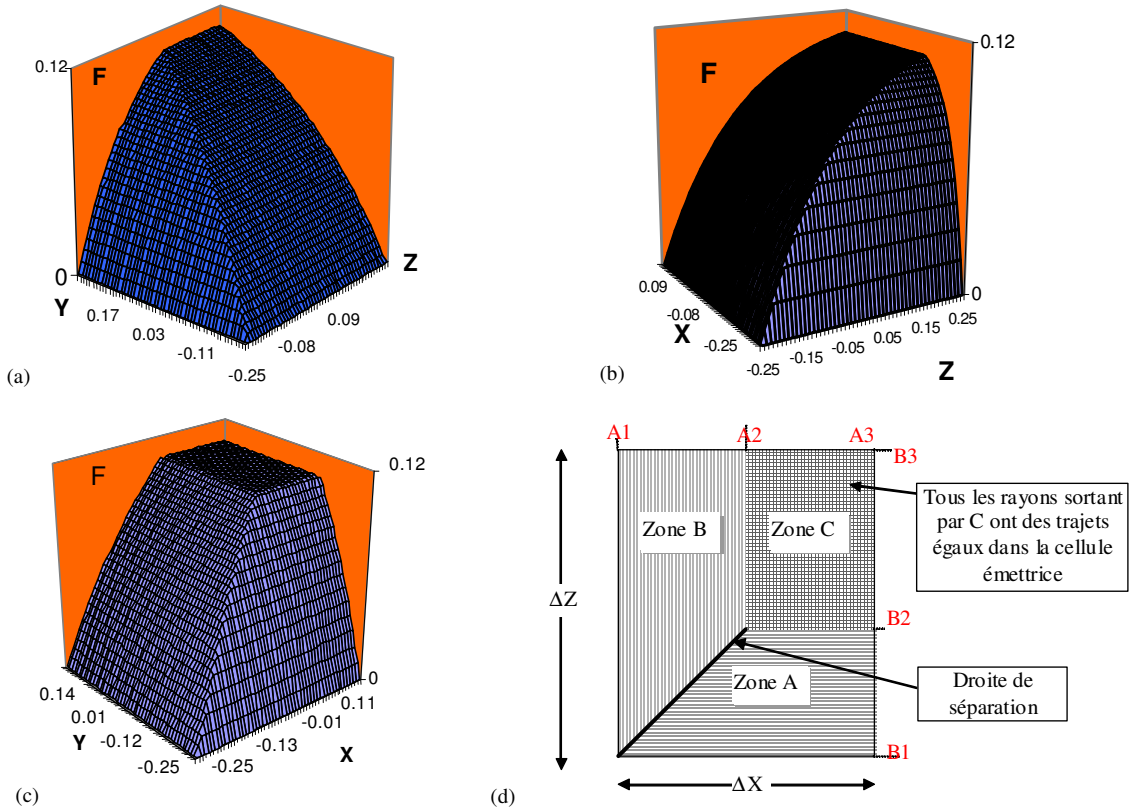


Figure IV.10 : Distributions 3-D relatives (a,b,c) et représentation schématique plane (d) de l'énergie émise par les faces d'une cellule turbide. a) Face avant (x = ΔX): F(y, z, u_f, LAD). b) Face droite (y = ΔY): F(x, z, u_f, LAD). c) Face du dessus (z = ΔZ): F(x, y, u_f, LAD). u_f = 5 $m^2.m^{-3}$. ΔY = ΔZ = 0.5 m. LAD sphérique. (θ_v, φ_v) = (60, 72)

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

- $\forall$ M(x,z) $\in$ zone A ($z < B2$ et $z < a.\frac{2x+\Delta X}{2} - \frac{\Delta Z}{2}$): $F_A(x,z,u_f,LAD) = \frac{\xi.[1-\exp\{-signe2.u_f.\Delta Y.\frac{(z-B1)}{|a|}\}}{1-\exp\{-signe2.u_f.\Delta Y.\frac{(B3-B1)}{|a|}\}}$ (IV-71)

- $\forall$ M(x,z) $\in$ zone B ($x < A2$ et $z > a.\frac{2x+\Delta X}{2} - \frac{\Delta Z}{2}$: $F_B(x,z,u_f,LAD) = \frac{\xi.[1-\exp\{-signe1.u_f.\Delta Y.(x-A1)\}}{1-\exp\{-signe1.u_f.\Delta Y.(A3-A1)\}}$ (IV-72)

- $\forall$ M(x,z) $\in$ zone C ($x \in [A2\ A3]$ et $z \in [B2\ B3]$) : $F_C(x,z,u_f,LAD) = \xi = \Delta\Omega_v.\{1 - e^{-G(\Omega_v).u_f.L_{max}}\}$ (IV-73)

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

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

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

$$W_{face}.\exp[-G(\Omega_v).u_{f'}.Lx_p].\int\!\!\int_{Face}(F_A+F_B+F_C).L_B(\lambda,T).\exp[-G(\Omega_v).u_{f'}.Lx].dS_{eff}$$
$$W_{face}.\exp[-G(\Omega_v).u_{f'}.Lz_p].\int\!\!\int_{Face}(F_A+F_B+F_C).L_B(\lambda,T).\exp[-G(\Omega_v).u_{f'}.Lz].dS_{eff} \quad \text{(IV-74)}$$

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

$$\Omega_{v,x}=\sin\theta_v.\cos\varphi_v\ ; \qquad \Omega_{v,y}=\sin\theta_v.\sin\varphi_v.\ ; \qquad \Omega_{v,z}=\cos\theta_v \quad \text{(IV-75)}$$

Et vu que : $L\alpha=\dfrac{n_\alpha.\frac{\Delta\alpha}{2}-\alpha}{\Omega_{v,\alpha}}$ où n_α=-signe($\Omega_{v,\alpha}$) pour α=x ou y et n_α=signe($\Omega_{v,\alpha}$) pour α=z (IV-76)

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

$$x_p=n_x.\frac{\Delta X}{2}+\frac{\Omega_{v,x}}{G(\Omega_v).u_{f'}}\ln\left(\frac{\int\!\!\int_{Zone\ A}F_A.T_{m,x}.dS_{eff}+\int\!\!\int_{Zone\ B}F_B.T_{m,x}.dS_{eff}+\int\!\!\int_{Zone\ C}F_B.T_{m,x}.dS_{eff}}{W_{face}}\right) \text{ où } T_{m,x}=L_{max}.e^{-G(\Omega_v).u_{f'}.Lx} \quad \text{(IV-77)}$$

$$z_p=n_z.\frac{\Delta Z}{2}+\frac{\Omega_{v,z}}{G(\Omega_v).u_{f'}}\ln\left(\frac{\int\!\!\int_{Zone\ A}F_A.T_{m,z}.dS_{eff}+\int\!\!\int_{Zone\ B}F_B.T_{m,z}.dS_{eff}+\int\!\!\int_{Zone\ C}F_B.T_{m,z}.dS_{eff}}{W_{face}}\right) \text{ où } T_{m,z}=L_{max}.e^{-G(\Omega_v).u_{f'}.Lz} \quad \text{(IV-78)}$$

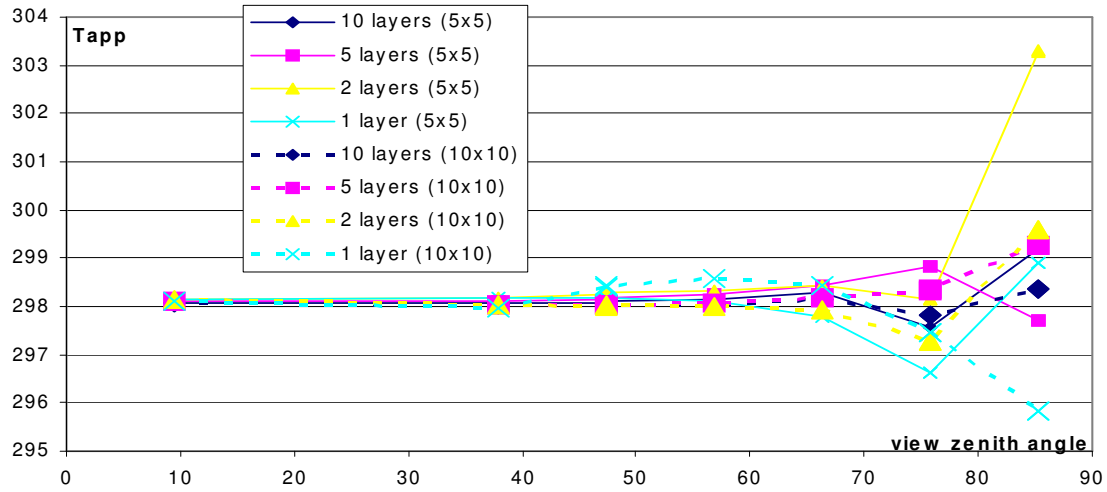


Figure IV.11: Précision de $T_{app}(\Omega_v)$ selon l'angle zénithal de visée. Discrétisation N_{sf} (5x5 ou 10x10), avec 1, 2, 5 et 10 couches. LAI=5. ϕ_{sv} = 90°. ε_f = 1 et T_f = 298K.

8 ÉMISSION D'UNE CELLULE MIXTE

Comme déjà indiqué (*cf.* 4), une cellule mixte comprend (1) N_{surf} différentes surfaces opaques et (2) N_{turb} différents milieux turbides. Les N_{surf} figures sont caractérisées par leurs propriétés optiques $\{\varepsilon_{surf,u}[\Omega_s,\Omega_v)],...\}$ et géométriques $\{M_{s,surf,u}$ *i.e.* barycentre géométrique$\}$, ainsi que par leurs températures $T_{surf,u}$ et leurs surfaces dans la cellule S_u où u ∈ [1 N_{surf}]. De même, chaque *t* milieu turbide est caractérisé

par son LAD, sa température $T_{f,t}$ et son émissivité ε_{ft} où t ∈ [1 N_{turb}]. La Figure IV.12 indique comment l'émission thermique (mode (T) du modèle DART) d'une cellule mixte est modélisée. Seule l'itération 2 diffère de l'approche utilisée lors de la modélisation en mode (R).

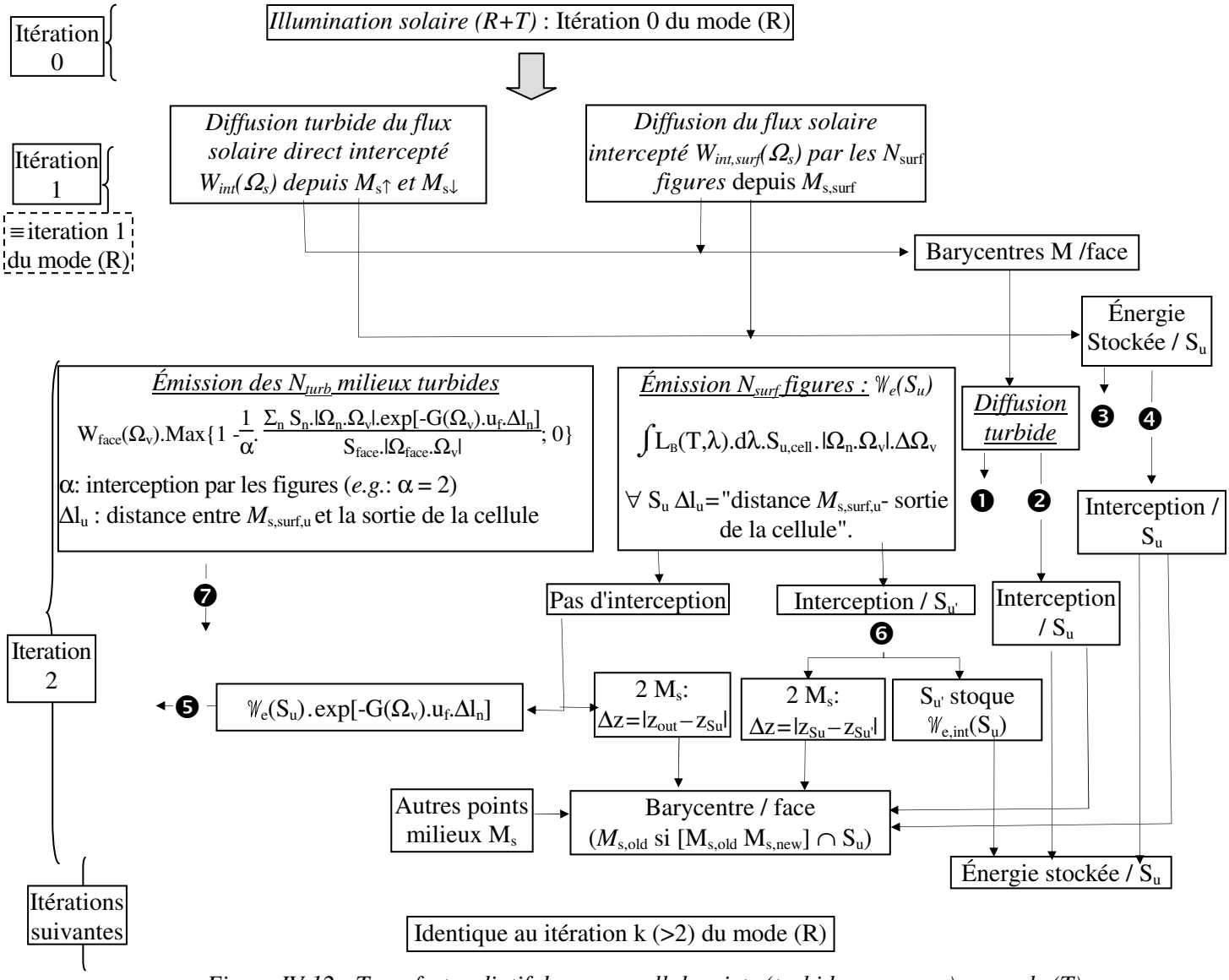


Figure IV.12 : Transfert radiatif dans une cellule mixte (turbide + opaque) en mode (T).

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

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

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

V MODES DE FONCTIONNEMENT ET PRODUITS DART

1 PRESENTATION

Le module *Dart* peut fonctionner en monospectral (1 bande spectral) ou multispectral (Q bandes spectrales), selon le mode (R) ou (T), avec ou sans transfert radiatif (T-R) atmosphérique (*Figure V.1*). Le fonctionnement multispectral offre la possibilité de simuler une seule bande spectrale. Il diffère du cas monospectral dans le sens où les propriétés optiques des matériaux sont extraites d'une base de données "réflectance" (BDR) et interpolées pour tous les canaux. Si le T-R atmosphérique est activé, la l'atmosphère est spécifiée avec des paramètres entrés par l'opérateur (fonctionnement monospectral ou mutlispectral avec Q = 1) ou calculés à partir d'une base de données atmosphérique (BDA : *cf.* 3).

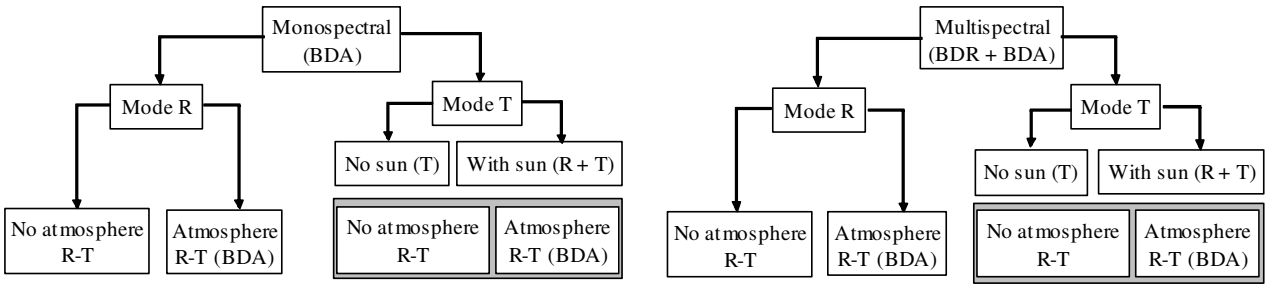


Figure V.1: Résumé des différents fonctionnements de DART. Mode R et T avec et sans transfert radiatif (R-T) atmosphérique. Bases de données "réflectance" (BDR) et "atmosphère" (BDA).

Toute simulation DART (*Figure V.2*) est gérée par une interface graphique "*DARTI*" utilisée pour entrer tous les paramètres, lancer les exécutables (*Direction*, *Phase*, *etc.*) et afficher certains résultats (maquette et produits de DART). Cette interface (*Figure V.2*) crée dans le répertoire ("./input/.") des fichiers xml (*direction.xml*, *phase.xml*, atmosphere.xml, *coeff_diff.xml*, *urban.xml*, *dart.xml*, *etc.*) utilisés en entrée par chacun des 5 exécutables (dont 1 optionnel) du système DART, pour stocker dans le répertoire ("/output") des informations utilisées par les autres exécutables.

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

- ***Phase***. Ce module calcule à partir des 3 fichiers d'entrée (*phase.xml*, *coeff_diff.xml* et *atmosphere.xml*) (i) les propriétés optiques des différents éléments de la scène et leurs fonctions de transfert associées ainsi que (ii) les propriétés de l'atmosphère. Pour une simulation multispectrale, l'opérateur définit un nombre *Q* de bandes spectrales $\{[\lambda_{min}(q) \ \lambda_{max}(q)]$ avec $q \in [0 \ Q-1]\}$ de travail pour que *Phase* calcule les propriétés spectrales des éléments du paysage terrestre et de l'atmosphère à partir des bases de données respectives BDR (*Tableau V.2* et Tableau V.3) et BDA sur [0.3μm 14μm].

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

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

Nb Lambertien - Nb Lambertian + Specular - Nb Hapke + Specular - Nb Phase for opaque surfaces - Nb Leaf Phase
4 0 0 0 1

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

* Lambertian .
Parameters : 0/1 - Name - Ro - Ecart-Type *
1 sol 0.330000 0.000000
1 tronc 0.200000 0.000000
1 toit 0.300000 0.000000
1 mur 0.300000 0.000000

* Lambertian + Specular.
Parameters : 0/1 - File Name - Ro - A - Alpha - Refraction Index - Albedo moy - Albedo spec *

* Hapke + Specular.
Parameters : 0/1 - Name - w - B0 - b1 - b2 - c1 - c2 - h - A - Alpha - Refraction Index - Albedo moy *

* Phase.
Parameters : 0/1 - File Name - Number of parameters
if this number is 4 (Lambertan + Specular) :
- Ro - A - Alpha - Refraction Index - Albedo moy
if this number is 10 (Hapke + Specular) :
-Albedo - B0 - b1 - b2 - c1 - c2 - h - A - Alpha - Refraction Index - Albedo moy *

* Understory.
Parameters : 0/1 - File Name - omegaMin - omegaMax - clumpingA - clumpingB - LAD - (Ellipsoidal : ALA - Elliptical : Thetam - Eccentricity) - Dim Foliar - RoSup - RoInf - To - IndRefracInf - IndRefracSup - TypeRugositeInf - KoInf - (Ind_RugInf) - TypeRugositeSup - KoSup - (Ind_RugSup) - Albedo moy Albedo spec *
1 feuille 1.000000 0.000000 0.000000 0.000000 1 0.010000 0.300000 0.300000 0.200000 1.400000 1.400000 0 1.000000 0 1.000000 0.500046 0.000000

*Tmin, Tmax for soil : * 300.000000 310.000000

```
*Tmin, Tmax for water :                    * 300.000000 310.000000
*Tmin, Tmax for roads :                    * 300.000000 310.000000
*Tmin, Tmax for opaque plots :             * 300.000000 310.000000
*Tmin, Tmax for roofs :                    * 300.000000 310.000000
*Tmin, Tmax for walls :                    * 300.000000 310.000000
*Tmin, Tmax for Trunks :                   * 300.000000 310.000000
*Temperature for bounding walls:           * 300.000000
*Tmin, Tmax for leaf phase function nb 0:  * 300.000000 310.000000
```

These temperatures are necessary for DART mode (T).

Tableau V.1: Exemple de fichier "coeff_diff.src" pour un fonctionnement monospectral.

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

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

- *Matériau minéral* :

```
* text that describes the material *
* Number of Lambda pertinent values * 491
* Lambda_min - Lambda_max * 0.42  14
* Hapke parameters: Bo - h - b1 - c1 - b2 - c2  *  1 1 1 1 1
* Lambda - Ro - Refraction Index - A - Alpha - ω_Hapke - A_Hapke_spec - Alpha_Hapke_spec *
 0.42     4.522          1.4      1000   0.2        30          1000              0.2
   ….....................................................................
 14       4.029          1.4      1000   0.2        30          1000              0.2
```

Lambda and Ro (lambertian reflectance) values are from the Aster data base. Other parameters are defined by the user

Tableau V.2: Structure de fichier de la BDR d'un matériau minéral.

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

- *Matériau végétal* :

```
* Text that describes the material *
* Number of Lambda pertinent values : * 550
* Lambda_min - Lambda_max : * 0.302  14
* Leaf parameters: LAD - Foliar dimension(m) - Upper type of roughness [0/1:cst/var] - Lower type of
    roughness * 1 (spherical) 0.05  0  0
* Lambda - Lower reflectance - Upper reflectance - Transmittance - n_inf - n_sup - Koinf [0 1] - Kosup -
    Ind_rugInf [0.1 0.3] - Ind_rugSup *
 0.302   2.9582    2.9582    2.9582    1.4    1.4    0.9
   ……….....
```

Base ASTER ⇒ $R_{abaxial}$, $R_{adaxial}$, transmittance
User ⇒ n_{inf}, n_{sup}, Koinf, Kosup, Ind_rugInf, Indrug_Sup

Tableau V.3: Structure de fichier de la BDR d'un matériau végétal. cf. légende de Tableau V.1

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

- ***Maket***. Simulation du paysage sur lequel opère le module *Dart*. Il utilise 3 fichiers d'entrée dont 1 optionnel : *maket.xml*, *urban.xml*, *f_MNT* (si relief). La scène et les figures planes associées sont stockées respectivement dans le fichier *mak* (*cf.* 1) et le fichier *figures.src* (Tableau V.4). Dans le cas d'un MNT, *f_MNT* est un fichier raster (même taille que toute couche horizontale de *mak*) qui donne l'altitude (float) des pixels. Pour chacun d'eux, le sommet des triangles du relief triangularisé est renseigné dans le fichier *f_MNT.dart*.

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

Tableau V.4: Le fichier figures.src contient le nombre total de figures suivi à chaque ligne de leurs caractéristiques respectives : nature de la figure (codée en hu), coordonnées (x,y,z) des 3 sommets + vecteur normal Ω_n (codés en float), propriétés optiques C_1 (type de diffusion) et C_2 (N° de fonction de transfert associée à C_1) qui font référence à une ligne de coeff_diff.src et indice du type d'élément (Mur, Toit, etc.) représenté.

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

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

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

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

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

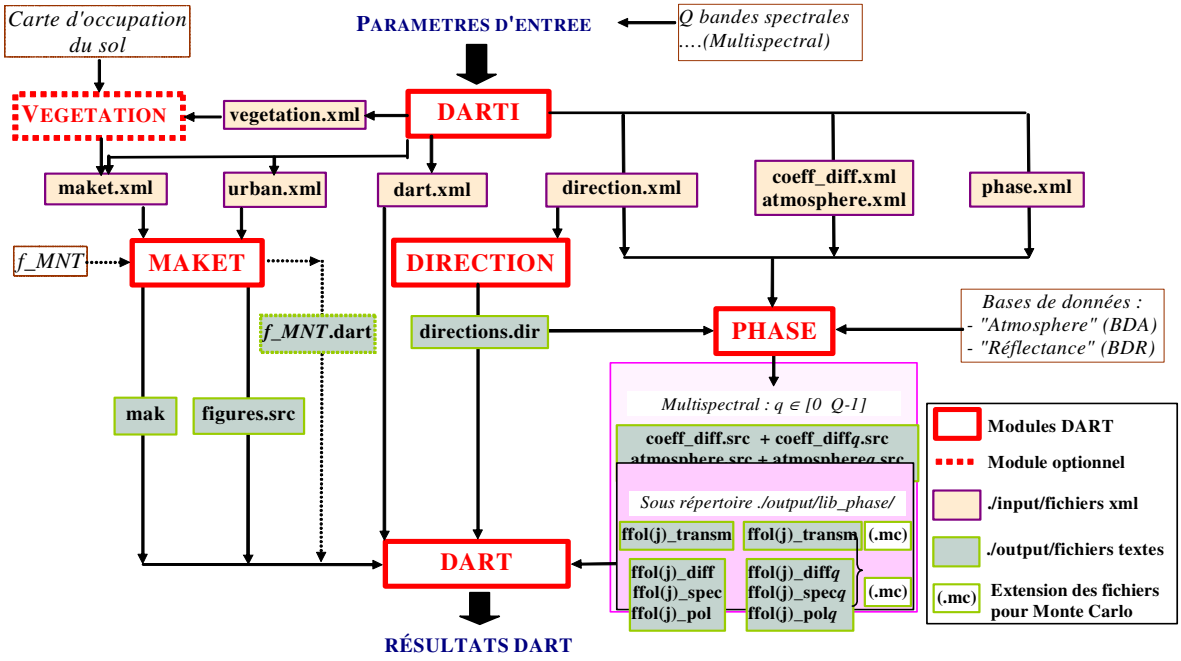


Figure V.2 : Modules de DART. Création et utilisation des fichiers (format xml) utilisés.

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

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

2 ETAPES MAJEURES D'UNE SIMULATION

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

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

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

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

La modélisation du T-R "Terre-Atmosphère" comprend 5 étapes majeures (Figure V.3, Figure V.4).

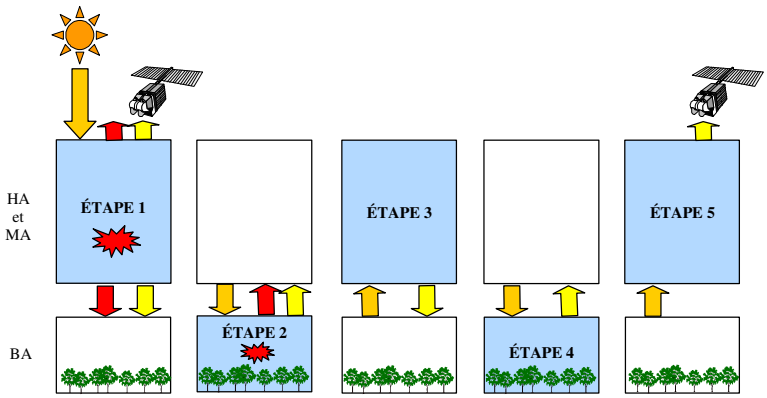


Figure V.3 : Principales étapes de la simulation du T.R. dans le système "Terre - Atmosphère". L'émission thermique du mode (T) est indiquée par le symbole dentelé rouge (étapes 1 et 2).

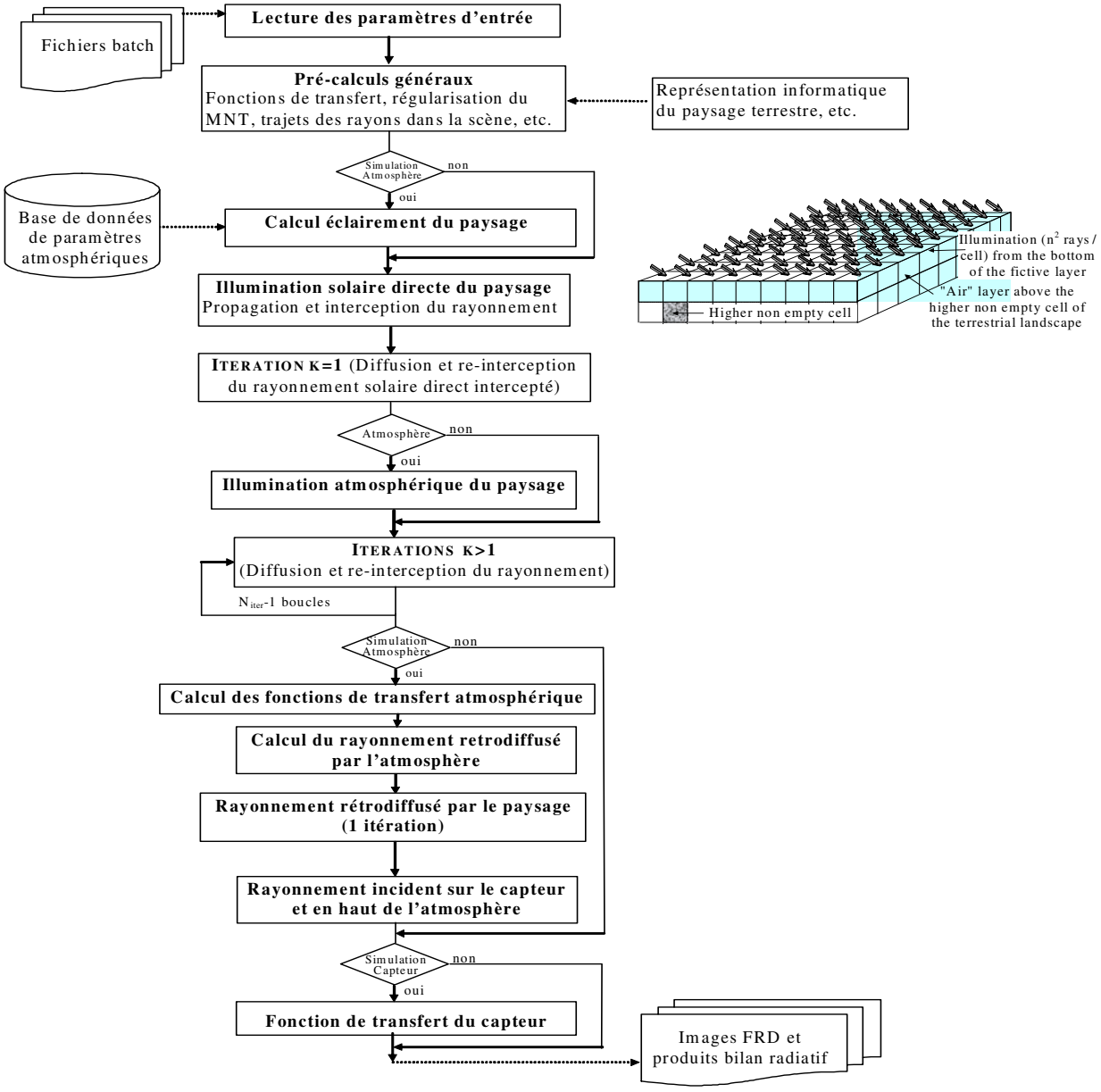


Figure V.4 : Diagramme du mode R monospectral.

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

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

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

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

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

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

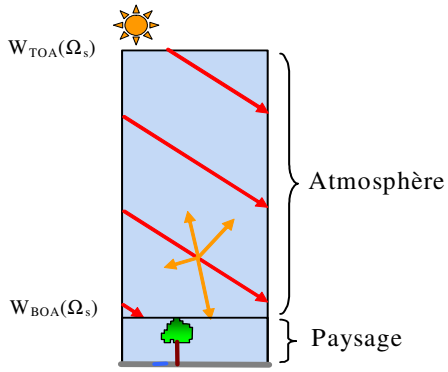


Figure V.5 :
T-R atmosphérique pour calculer l'éclairement du paysage terrestre. Mode (R).

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

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

L'éclairement solaire direct $E_{s,BOA}(\Omega_s)$ de la maquette terrestre peut être spécifié de différentes manières (Figure V.7), selon qu'il y ait ou non la simulation du T-R atmosphérique. Il est simulé par 49 rayons parallèles $W_{BOA,dir}(\Omega_s)$ issus du bas de chaque cellule de la couche fictive juste au-dessus de la maquette (Figure V.6). Les rayons sont suivis dans la maquette tant que $W(\Omega_s) > T_1.W_{BOA,dir}(\Omega_s)$. L'énergie éliminée est stockée dans le fichier *report**q**.out*. L'énergie interceptée par les cellules est stockée cellule par cellule pour être en partie diffusée à l'itération k=1. La couche fictive en haut de BA qui stocke les rayons montants est sur-échantillonnée.

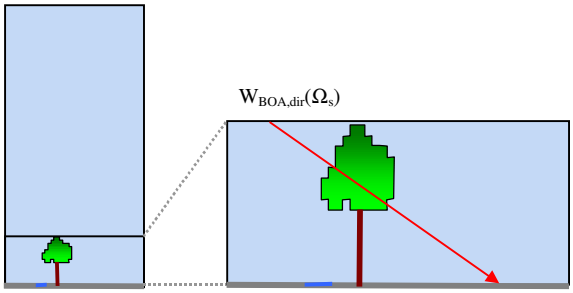
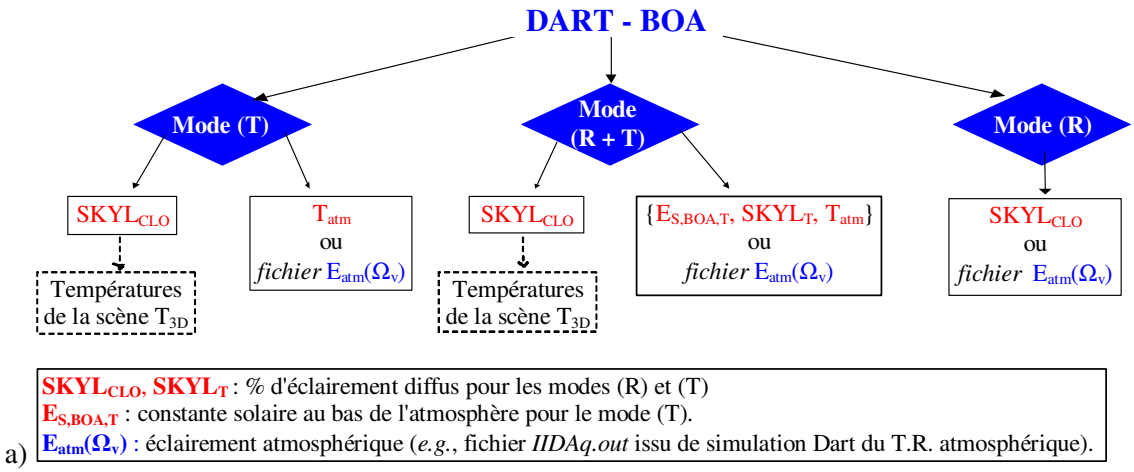
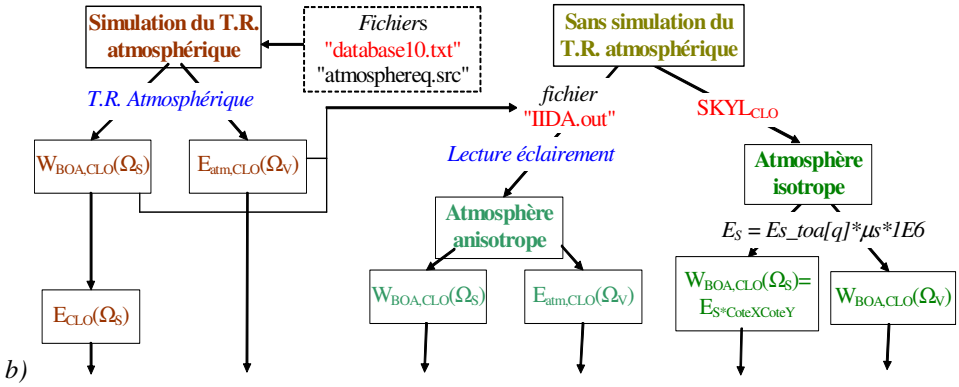


Figure V.6 :
Schéma de l'illumination solaire directe du paysage.



a)



b)

Figure V.7. Eclairement atmosphérique. a) Mode monospectral sans T.R. atmosphérique. Les paramètres en rouge peuvent être directement saisis par l'utilisateur. b) Mode (R), avec / sans simulation du T.R. atmosphérique.

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

Toute cellule qui a intercepté de l'énergie à l'itération k=0, diffuse une part de cette énergie selon les directions possibles (Figure V.8). Tout rayon est suivi dans la maquette jusqu'à ce qu'il sorte par le haut de celle-ci, qu'il soit totalement intercepté ou que son énergie devienne $<T_2>.<\Sigma W>_{1,2}.\frac{\Delta\Omega_n}{4\pi}$. L'énergie interceptée cette diffusion est stockée par cellule pour être en partie diffusée à l'itération 2.

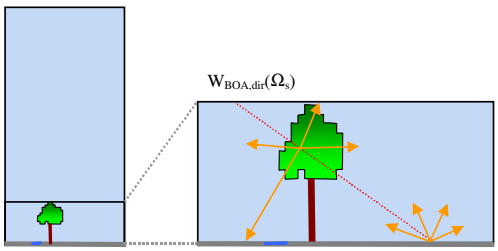


Figure V.8 : Schéma de l'itération k=1.

- *Illumination atmosphérique du paysage*

Les rayons atmosphériques $W_{BOA,diff}(\Omega_n)$ se propagent à partir du bas des cellules de la couche fictive, à raison d'un rayon pour chaque direction Ω_n descendante (*Figure V.9*).

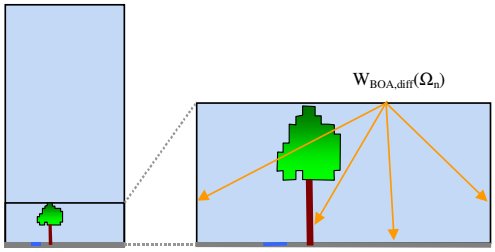


Figure V.9 :
Schéma de l'illumination atmosphérique du paysage.

- *Itération k>1*

Toute cellule qui a intercepté de l'énergie lors de l'itération k-1, en diffuse une partie dans les N_{dir} directions de propagation possibles (Figure V.10). Ce processus se réitère jusqu'à l'itération N_{iter} ou à une itération inférieure si la variation relative de l'albédo (mode R) ou de l'exitance (mode T) de la maquette du paysage est inférieure à un seuil T_3 défini par l'opérateur (*cf.* 2). Tout rayon dont l'énergie devient inférieure à $T_2.<\Sigma W>_{1,2}.\frac{\Delta\Omega_n}{4\pi}$ est arrêté. La distribution 3-D de l'énergie absorbée et interceptée par le paysage terrestre est stockée. Ce résultat est utile pour l'étude des surfaces terrestres : activité photosynthétique, bilan d'énergie, *etc*.

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

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

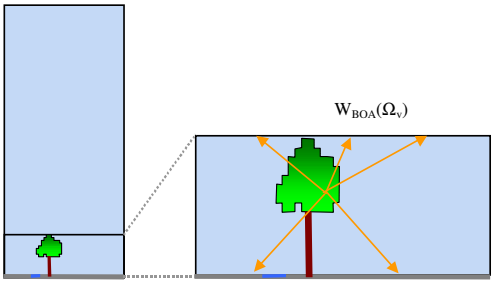


Figure V.10 :
Schéma de l'itération k>1.

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

L'atmosphère diffuse vers le paysage terrestre une partie du rayonnement lors de l'étape 2 Pour diminuer les temps de calcul, cette diffusion est calculée en convoluant l'énergie montante en haut de BA avec une fonction de transfert FT_{BA-BA} pré-calculée sans suréchantillonnage de la couche

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

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

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

- **Etape 5 :** ***Rayonnement mesuré par le capteur et en haut de l'atmosphère***.
  Cette étape calcule les flux reçus par le capteur et/ou en haut de l'atmosphère (Figure V.11), à partir des flux montants en haut de la couche BA et des fonctions de transfert $FT_{BA-Capteur}(\Delta i,\Delta j,\Omega\uparrow,\Omega'\uparrow)$ et $FT_{BA-TOA}(\Delta i,\Delta j,\Omega\uparrow,\Omega'\uparrow)$. La fonction $FT_{BA-TOA}(\Delta i,\Delta j,\Omega\uparrow,\Omega'\uparrow)$ donne le flux montant $W_{BOA}(i',j',\Omega\uparrow)$ selon toute direction montante $\Omega'\uparrow$ en tout pixel (i',j') à l'altitude du capteur, due à un rayon unité $W_{BOA}(i,j,\Omega\uparrow)$ issu du pixel ($i=i'-\Delta i$, $j=j'-\Delta j$) du haut de (BA) selon la direction montante $\Omega\uparrow$.

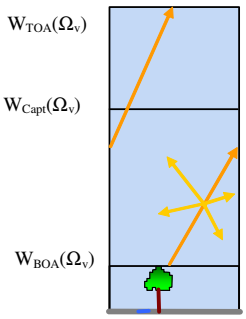


Figure V.11 : Schéma du rayonnement montant jusqu'au capteur et le haut de l'atmosphère.

Ainsi, on a :

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

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

Les fonctions de transfert FT_{BA-BA}, $FT_{BA-Capteur}$ et FT_{BA-TOA} sont pré-calculées simultanément (Figure V.12) à partir d'un rayon d'énergie unité montant du sommet de BA, pour toutes les directions montantes. Les diffusions d'ordre 3 sont simulées (3 itérations). Pour améliorer leur précision, les couches horizontales (MA, capteur et TOA) sont sur-échantillonnées pour le rayonnement direct montant. Par contre, de manière à ne pas augmenter les temps de calcul pour une composante moins forte que le rayonnement direct, ces 3 couches ne sont pas sur-échantillonnées pour le rayonnement indirect. Ainsi, FT_{BA-TOA} est décomposé en un scalaire (Dirac) pour le rayonnement montant direct (*i.e.*, $\Omega\uparrow = \Omega'\uparrow$) et une matrice $FT_{BA-TOA,diffus}$ pour le rayonnement montant diffus. Les rayons montants $W_{TOA}(i, j, \Omega_v)$ et $W_{capt}(i, j, \Omega_v)$ forment les images FRD ou T_B.

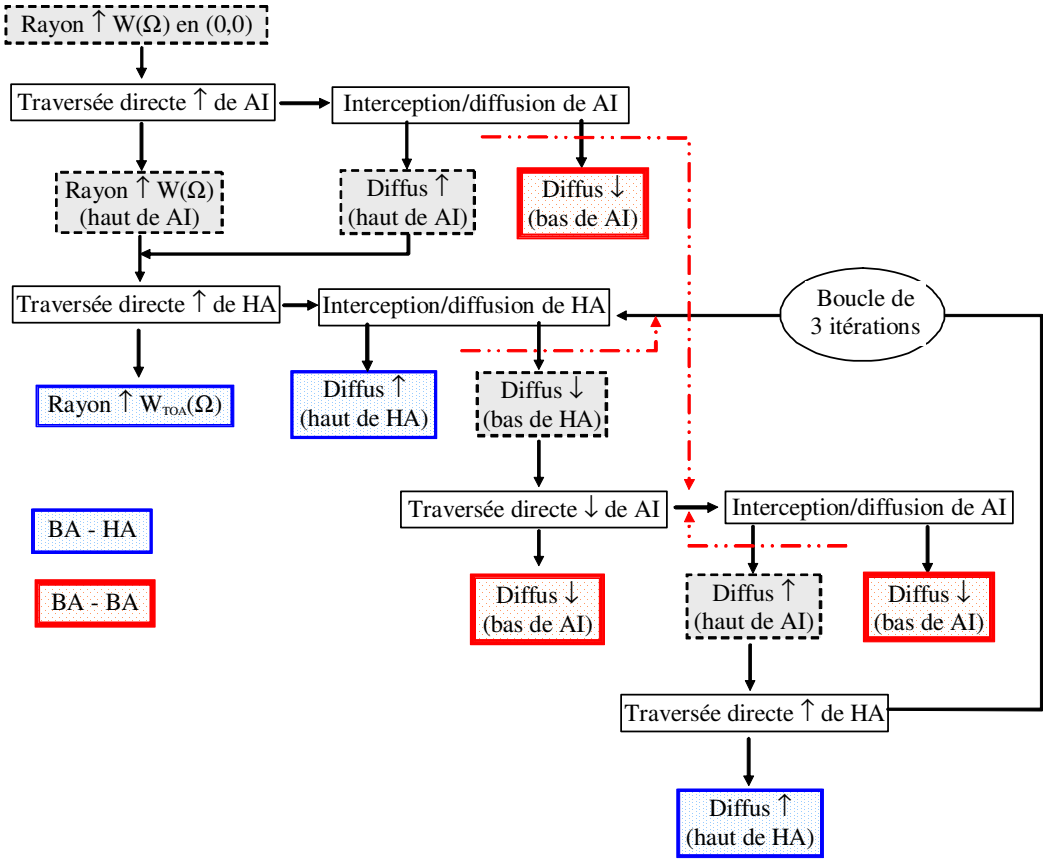
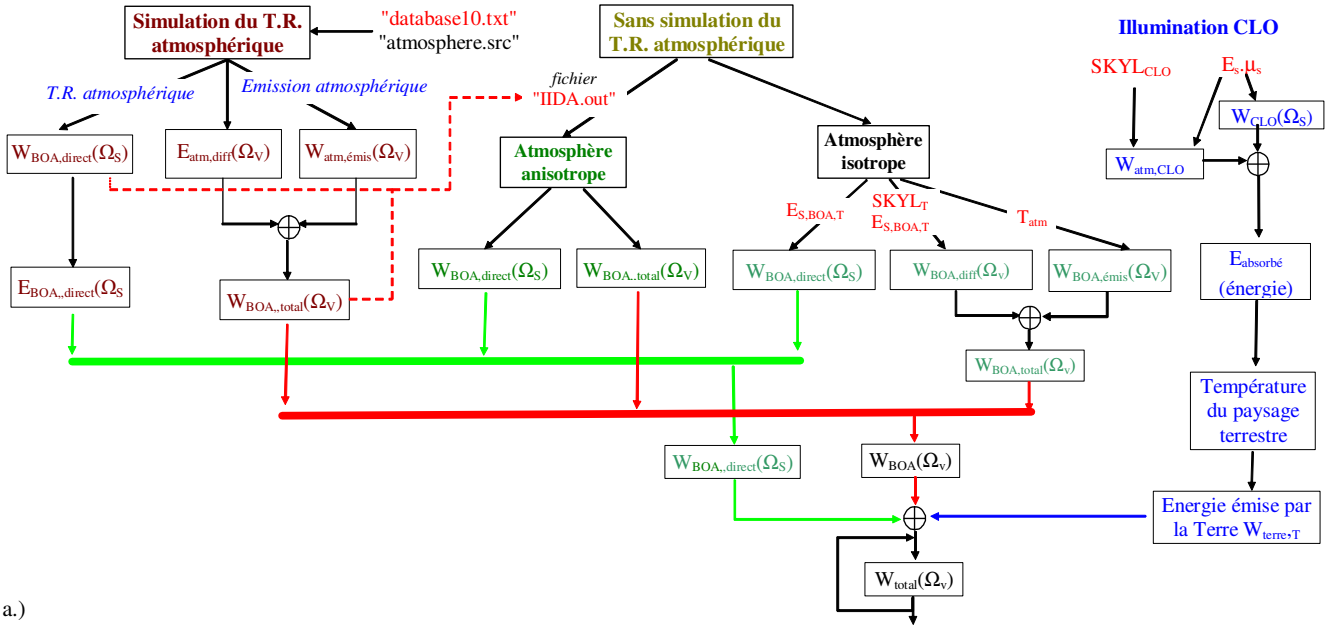


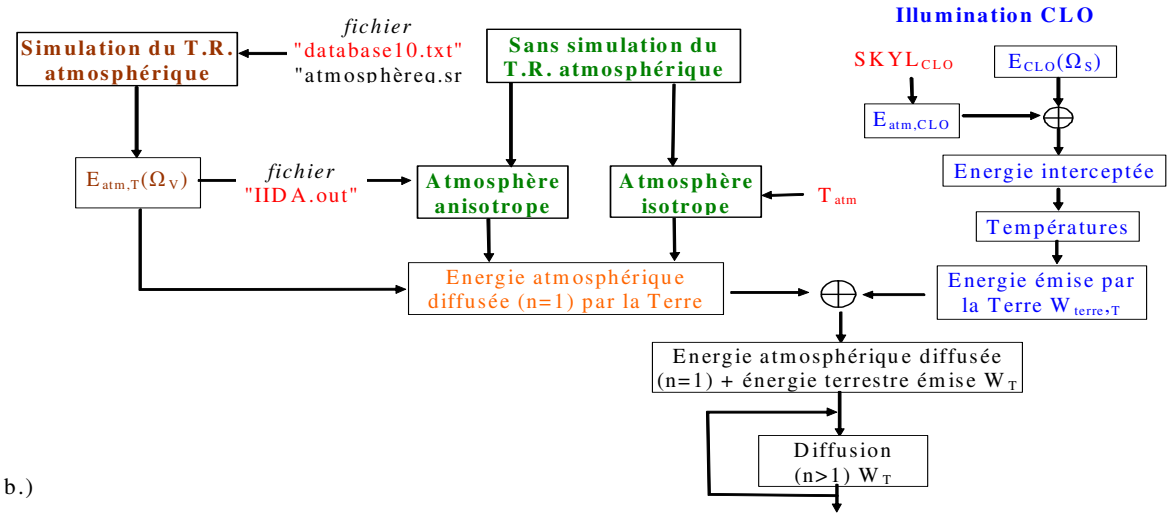
Figure V.12 : Calcul des fonctions de transfert $FT_{BA\text{-}BA}$ et $FT_{BA\text{-}TOA}$.

3 MODE (T)

Comme le mode (R), le mode (T) peut fonctionner en monospectral (Figure V.13) ou multispectral, sans simulation ou avec simulation du T-R atmosphérique. La Figure V.13.b illustre le cas "sans simulation atmosphérique". La Figure V.14 donne l'algorithme général du mode (T).



a.)



b.)

Figure V.13 : Simulation DART en mode (T), sans (a) et avec (b) éclairement solaire.

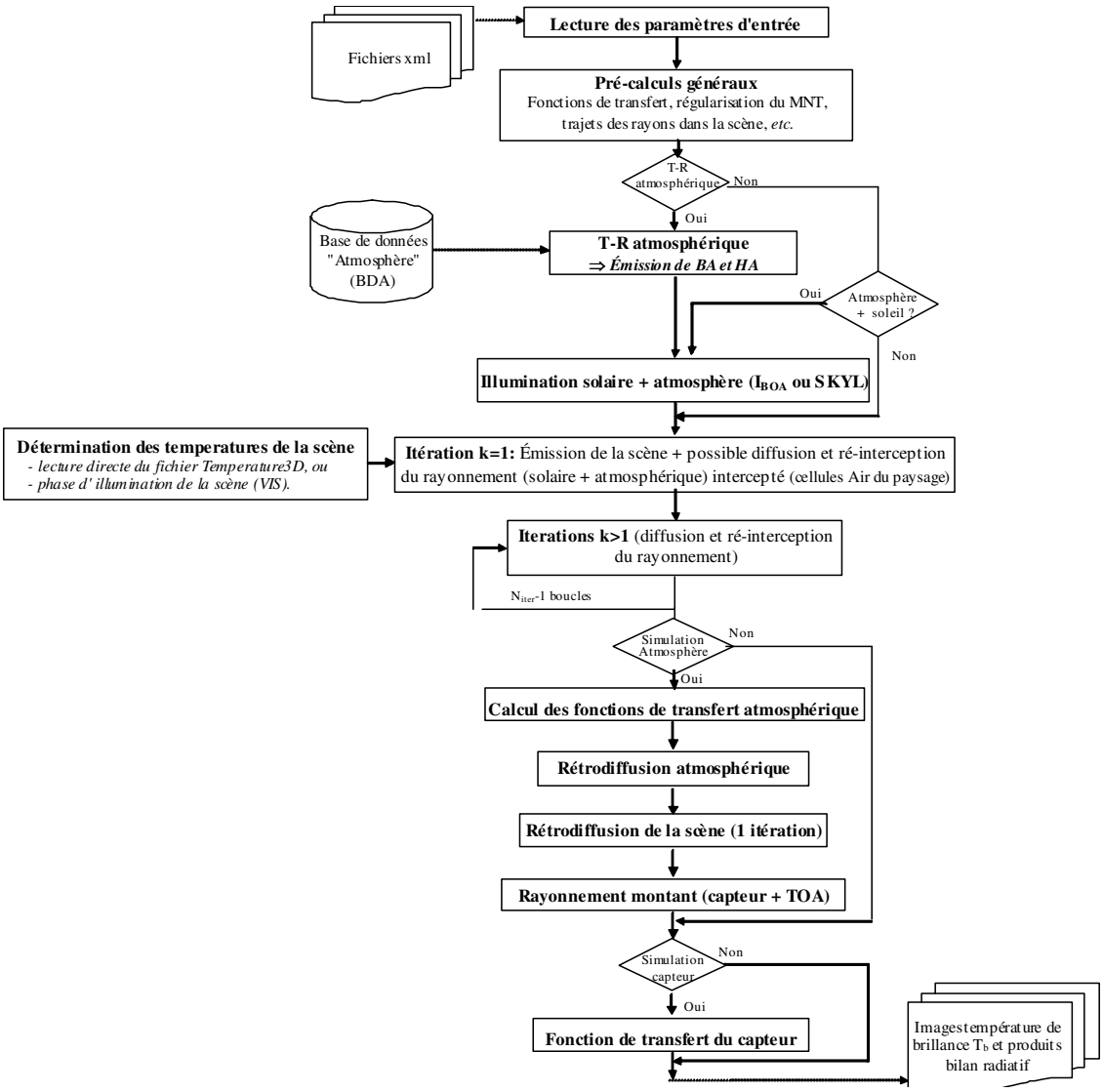


Figure V.14 : Algorithme du mode (T) de DART monospectral.

4 PRODUITS DART ATMOSPHERIQUES EN MODE (R)

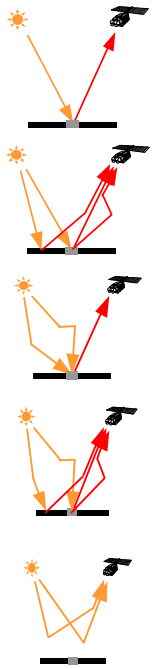
- ***Mode standard***

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

- ***Mode non standard***

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

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



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

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

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

Le fichier *report**q**.out* stocke certaines propriétés optiques de l'atmosphère (Tableau V.5). La transmittance gazeuse verticale est un paramètre d'entrée ou est calculée à partir d'une base de données pour la bande spectrale considérée. Les différents produits albédos et éclairement n'ont de sens que pour les longueurs d'ondes inférieures à la longueur d'onde qui sépare les modes "R" et "R+T".

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

Tableau V.5: *Paramètres atmosphériques calculés par DART stockés dans le fichier report**q**.out*.

5 PRODUITS ATMOSPHERIQUES EN MODE T OU "R + T"

- ***Mode standard***

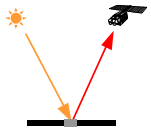
  - Profil vertical du % de rayonnement incident absorbé (fAR_{ATM}) par toute couche atmosphérique.

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

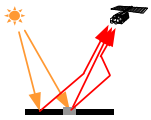
- ***Mode non standard***

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

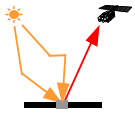
  - $T_{B\text{-}direct,capt}$ et $T_{B\text{-}direct,TOA}$: Température de brillance due au rayonnement "émission + réflexion du rayonnement solaire direct (R + T)" issu du paysage terrestre et qui remonte vers le capteur ou le haut de l'atmosphère sans être diffusé par l'atmosphère.



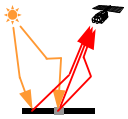
- $T_{B\text{-}tot,capt}$ et $T_{B\text{-}tot,TOA}$: Température de brillance due au rayonnement "émission + réflexion du rayonnement solaire direct (R + T)" issu du paysage terrestre et qui atteint le capteur ou le haut de l'atmosphère de manière directe ou diffuse.



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



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



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



6 PRODUITS DE DART

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

● ***Produits "FRD et T_B"***

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

Tableau V.6 : Produits facteur de réflectance (FRD) / température de brillance (T_B) directionnels.

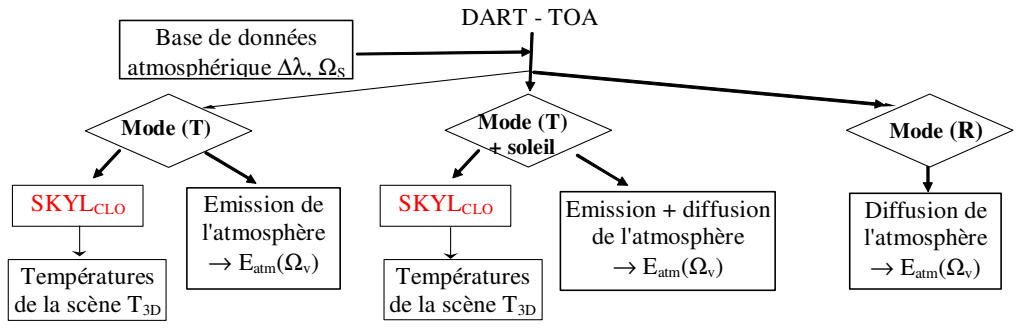


Figure V.15: Produits de {DART monospectral + T.R. atmosphérique. Modes (R) et (T)}.

Les produits "FRD / T_B" (Tableau V.6, Figure V.15) sont des "FRD / $T_B(\Omega_v)$" et des images FRD. Ils sont fournis à 3 niveaux : bas de l'atmosphère (BOA : *Bottom Of the Atmosphere*), haut de l'atmosphère

(TOA : *Top Of the Atmosphere*) et capteur radiométrique. DART propose en option le FRD associé au rayonnement polarisé (Pinel, 1997) ainsi que le rayonnement diffusé et/ou émis en dernier par le feuillage des arbres, le sol ou la couche homogène de végétation. Les produits "FRD/T_B" peuvent être donnés à chaque itération (1 à N_{iter}) et à une itération dite infinie, à l'aide d'une extrapolation exponentielle des résultats des trois dernières itérations. En mode "T" ou {"R + T" avec $\lambda_{min}[q] > \lambda_2$}, la température de brillance est calculée en appliquant la loi de Planck inverse sur la luminance spectrale directionnelle.

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

Tableau V.7: Produits DART

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

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

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

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

- ***Produits "Bilan radiatif"***

Mode R : les produits bilan radiatif (Tableau V.8) sont :

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

- Fraction de flux absorbé 3-D (fAR): $\frac{\text{énergie absorbée (Watts) / cellule}}{\text{énergie} \downarrow \text{/ cellule du paysage terrestre}}$ (0 si cellule vide)
- Fraction de flux diffusé 3-D (fSR): $\frac{\text{énergie (Watts) diffusée / cellule}}{\text{énergie} \downarrow \text{/ cellule du paysage terrestre}}$ (0 si cellule vide)
- Fraction de flux intercepté 3-D (fInt): $\frac{\text{énergie (Watts) interceptée / cellule}}{\text{énergie} \downarrow \text{/ cellule du paysage terrestre}}$ (0 si cellule vide)
- Profils verticaux 1D fIR, fAR, fSR et fIntR : $\frac{\Sigma \text{ f}\ldots. \text{ des cellules non vides d'une couche}}{\text{Nombre de cellules (vide + pleine) par couche}}$

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

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

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

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

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

Tableau V.8: Produits "bilan radiatif". (I: incident. A: absorbé. S: diffusé (scattered) (émis en mode T à l'itération 1). Int: intercepté. L'extrapolation (exponentielle spécifique à chaque cellule) des produits fIR, fAR, fSR, fIntR est optionnelle.

● ***Produits "Indice foliaire"***

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

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

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

Tableau V.9

Ensemble des produits "indice foliaire".