



**HAL**  
open science

## Modélisation du Transfert radiatif Atmosphérique dans le modèle DART

Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry, Eloi Grau, Ferran Gascon, J. Rubio,  
Aurore Brut

► **To cite this version:**

Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry, Eloi Grau, Ferran Gascon, J. Rubio, Aurore Brut. Modélisation du Transfert radiatif Atmosphérique dans le modèle DART. Journées d'Animation Scientifique (JAS09) de l'AUF Alger Novembre 2009, 2009, Algeria. ird-00406646

**HAL Id: ird-00406646**

**<https://ird.hal.science/ird-00406646>**

Submitted on 23 Jul 2009

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

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

# Modélisation du Transfert radiatif Atmosphérique dans le modèle DART

Gastellu-Etchegorry J.P.<sup>\*</sup>, Grau E.<sup>\*</sup>, Gascon F.<sup>\*\*</sup>, Rubio J.<sup>\*\*\*</sup>, Brut A.<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Université de Toulouse, UPS - CNES - CNRS - IRD, CESBIO, 18 Av. Edouard Belin, 31401 Toulouse, France  
jean-philippe.gastellu-etchegorry@cesbio.cnes.fr

<sup>\*\*</sup> ESA (European Space Agency), TEC-EEP, Keplerlaan 1, 2200AG - Noordwijk, Pays Bas, ferran.gascon@esa.int

<sup>\*\*\*</sup> NASA, GSFC, Greenbelt, MD 20771 / Université du Maryland, Dpt Géographie, USA, jeremy.rubio-1@nasa.gov

**Résumé**— Le modèle DART (Discrete Anisotropic Radiative Transfer) simule le transfert radiatif (T.R.) 3D dans le système "Terre – Atmosphère". Les paysages terrestres sont urbains ou naturels, avec relief. DART opère dans le domaine optique de l'ultraviolet à l'infrarouge thermique. Il simule des images de télédétection spatiale, pour toute configuration instrumentale et expérimentale (direction de visée, résolution spatiale, etc.). Il simule aussi des spectres et le bilan radiatif 3D. La précision radiométrique est un objectif essentiel de DART. Cette précision implique une modélisation précise du couplage "Terre - Atmosphère". Récemment, le T.R. atmosphérique a fait l'objet d'une grande amélioration en terme de précision et de flexibilité. Son algorithme s'appuie sur un échantillonnage spécifique de l'atmosphère et sur des fonctions de transfert atmosphérique pour réduire les temps de calcul. Ainsi, comparé au modèle atmosphérique ModTran, la précision de DART, en terme d'erreur relative, est passée de 6.5% à 1.3%.

**Mots clefs** — DART, atmosphère, modèle, transfert radiatif

## I. INTRODUCTION

Le modèle DART (Discrete Anisotropic Radiative Transfer) simule le transfert radiatif (T.R.) 3D dans le système "Terre – Atmosphère", avec une approche itérative de suivi de rayons selon un nombre fini de directions [1], [2], [3]. La scène terrestre est une matrice de cellules qui peut contenir des cellules turbides (par exemple pour simuler la végétation) et des triangles translucides (par exemple pour simuler des éléments foliaires ou des murs de maisons). Les paysages simulés peuvent contenir des éléments naturels (arbres, cultures, rivières, etc.) et des éléments urbains (maisons, routes, etc.) que DART simule ou importe. Dans ce dernier cas, ce sont des objets 3D (formats obj, x3d ou wrl). Du point de vue du transfert radiatif, toute scène est horizontalement infinie et répétitive.

En plus du bilan radiatif 3D, DART simule des images de télédétection spatiale, en réflectances et températures de brillance, et des spectres à toute altitude : bas de l'atmosphère (BOA), haut de l'atmosphère (TOA) et capteur entre TOA et BOA. Ces images sont simulées pour toute configuration expérimentale (direction solaire, état de l'atmosphère, propriétés optiques et géométriques du milieu) et expérimentales (bande spectrale fine ou large, résolution spatiale,

direction de visée, sensibilité spectrale du capteur, etc.). Une seule simulation DART peut donner des résultats dans plusieurs bandes spectrales avec des images pour toutes les directions montantes définies par l'opérateur. DART travaille en mode "R" (*i.e.*, réflectances), avec le soleil comme seule source de rayonnement, en mode "T" (*i.e.*, émission thermique) et en mode "R +T", c'est-à-dire une combinaison des modes "R" et "T". Le mode "R+T" est utile pour simuler le T.R. dans le domaine spectral proche de 3-4 $\mu$ m, où les sources de rayonnement à considérer sont à la fois le soleil, les milieux terrestres et l'atmosphère. DART comporte un module de simulation du T.R. basé sur la méthode de Monte Carlo, pour évaluer la précision de ses simulations. En fait, la précision du modèle DART a déjà été validée dans différentes expériences et comparaisons de modèles [4].

Le modèle DART comporte un certain nombre d'outils dédiés à la réalisation d'études de sensibilité et à l'inversion d'images de télédétection spatiale. En effet, un de ses modules permet de créer de manière très simple des séquences de simulations où un nombre donné de paramètres d'entrée (e.g., LAI: Indice foliaire) varie. Cette possibilité est utilisée ici dans les exemples montrés ci-dessous.

Le T.R. dans le système "Terre - Atmosphère" est d'autant plus complexe que le paysage terrestre est spatialement hétérogène. DART le prend en compte de manière intégrée de manière à bien modéliser le couplage radiatif entre la terre et l'atmosphère [5]. Ceci est essentiel pour la précision de la modélisation. Ce papier présente cette modélisation ainsi que quelques travaux de validation.

## II. MODELISATION DE L'ATMOSPHERE

### A. Propriétés optiques

Dans DART, l'atmosphère gazeuse est définie par son épaisseur optique de diffusion, par la fonction de phase de Rayleigh, ainsi que par la densité volumique verticale et l'épaisseur optique d'absorption des gaz majeurs (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CO, CH<sub>4</sub>,...). Les aérosols sont définis par un profil 1D de densité, un albédo spectral de diffusion simple, et la combinaison de 2 fonctions de phase de Henyey- Greenstein. De plus, un profil 1D de température est utilisé pour les simulations en mode "T" et "R+T". Les profils verticaux peuvent être des profils standards pour les gaz (e.g., US Standard, Tropical) et les aérosols (e.g., Rural, Maritime) ou bien des profils définis par l'opérateur.

**B. Géométrie de l'atmosphère**

L'atmosphère de DART est la superposition de 3 zones caractérisées par une maille d'échantillonnage qui décroît avec l'altitude. En effet, l'impact radiatif de l'atmosphère à la fois sur les images de télédétection spatiale et sur le bilan radiatif des surfaces terrestres décroît avec l'altitude, comme la densité atmosphérique. Ces 3 zones sont :

- Basse Atmosphère (BA). Cette zone représente l'air dans le paysage terrestre, par exemple pour simuler la pollution. Elle est constituée de cellules de mêmes dimensions que les cellules utilisées pour simuler la scène terrestre.
- Moyenne atmosphère (MA). Cette zone est comprise entre les zones BA et HA. Elle est simulée en tant que matrice de cellules. Les dimensions horizontales des cellules sont comprises entre les dimensions des cellules de la scène terrestre et les dimensions de la scène terrestre elle-même.
- Haute Atmosphère (HA). Cette zone s'étend du haut de MA jusqu'au sommet de l'atmosphère (e.g., 100km). Elle est constituée par la superposition de plusieurs couches homogènes horizontalement.

Les dimensions des cellules et des zones peuvent être ajustées pour assurer le meilleur compromis entre la précision et le temps de calcul. Toutes les cellules d'une même altitude au sein des zones MA et HA ont les mêmes coefficients d'extinction. Les cellules d'air de BA de même altitude peuvent par contre avoir des coefficients d'extinction différents.

**B. Algorithme du T.R. atmosphérique**

• **Présentation**

La modélisation du T.R. dans le système "Terre - Atmosphère" est réalisée en 5 étapes (

Figure 1), après avoir calculé plusieurs quantités physiques (Figure 3). Elle emploie 4 couches horizontales infinitésimales : couche "TA" au sommet de la zone "HA", couche "MA-HA" entre les zones "MA" et "HA", couche "BA" au bas de l'atmosphère et couche "Capteur" au niveau du capteur dans l'atmosphère. Elle emploie aussi des fonctions de transfert (FT) pour éviter la répétition de calculs identiques, et donc réduire le temps de calcul

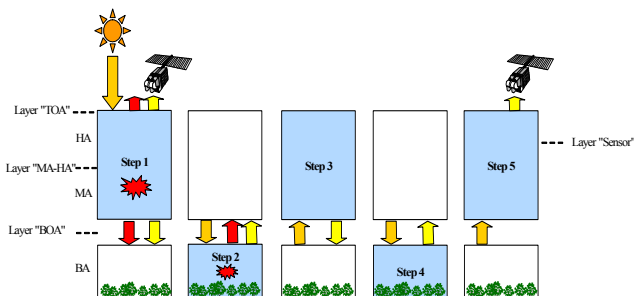


Figure 1: Etapes de la modélisation du T.R. dans le système "Terre - Atmosphère". Le symbole "☀" (étapes 1 et 2) est pour l'émission thermique en mode "T".

La Figure 2 illustre le cas d'une modélisation schématique avec 2 couches pour HA et 4 cellules pour MA. Les cercles rouges sont les flux interceptés et les croix rouges sont les sources de flux. Les différentes phases sont :

- Eclairage direct de l'atmosphère et de BOA.
- Diffusion de HA vers TOA et vers le niveau "HA-MA".
- Eclairage ↓ de MA et BOA depuis le niveau "HA-MA".
- Diffusion de MA vers les niveaux BOA et "HA-MA".
- Eclairage ↑ de HA et TOA depuis le niveau "HA-MA".

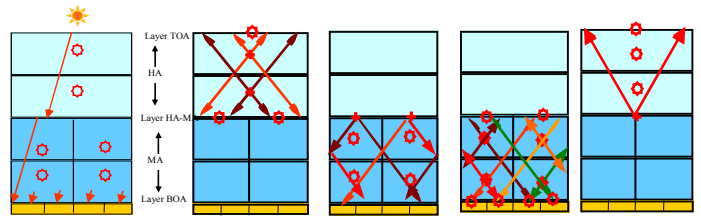


Figure 2: Modélisation DART du T.R. atmosphérique.

• **Fonctions de transfert atmosphérique**

DART utilise un certain nombre de FTs. Seules les fonctions de transfert  $TF_{BA-FL}$ , où FL (couche fictive) est pour la couche "TA" ou "Capteur", sont présentées ici. Elles donnent le flux incident sur un pixel (i',j') de la couche "FL", selon la direction  $\Omega_v$ , du à un flux qui quitte la cellule (i,j) de la couche "BA" selon la direction  $\Omega_s$ . Nous notons :  $\Delta i = i' - i$  et  $\Delta j = j' - j$ . Les symboles ↑ et ↓ sont pour les directions montantes et descendantes.

Quatre types de FTs sont utilisés pour gérer les composantes du transfert radiatif. Ci-dessous les indices pour la longueur d'onde sont omis, pour plus de clarté dans le texte.

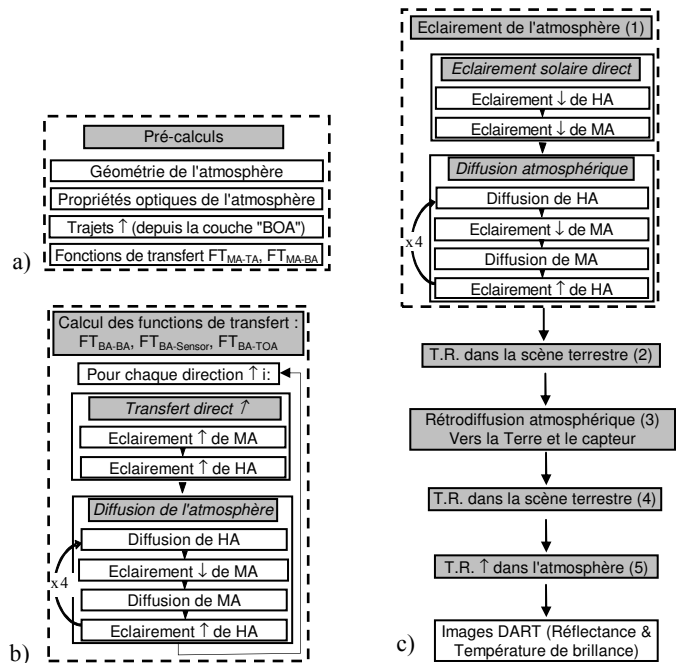


Figure 3 : Algorithme du T.R. atmosphérique de DART. a) Pré calculs. b) Calcul des fonctions de transfert. c) T.R. "Terre - Atmosphère".

Quatre FTs sont utilisées pour gérer les composantes du transfert radiatif. Les indices relatifs aux longueurs d'onde sont omis pour plus de clarté.

- Fonction de transfert "direct"  $FT_{BA-FL}^{dir}(\Delta i, \Delta j, \Omega_s^\uparrow, \Omega_s^\downarrow)$  : flux non diffusé  $W_{FL}(i', j', \Omega_s^\uparrow)$  qui atteint le pixel (i',j') de FL se-

lon la direction  $\Omega_s^\uparrow$ , après un trajet depuis le pixel  $(i,j)$  de BA selon  $\Omega_s^\uparrow$ . FL est spatialement sur-échantillonnée pour dégrader le moins possible la précision spatiale de la distribution 2D des flux montants issus de la scène terrestre.

- Fonction de transfert "direct-total"  $FT_{BA-FL}^{tot}(\Delta i, \Delta j, \Omega_s^\uparrow, \Omega_s^\uparrow)$  : flux total  $W_{FL}(i', j', \Omega_s^\uparrow)$  qui atteint le pixel  $(i', j')$  de FL selon  $\Omega_s^\uparrow$ , après un trajet depuis le pixel  $(i, j)$  de BA selon  $\Omega_s^\uparrow$ .
- Fonctions de transfert "diffus" :  $FT_{BA-BA}(\Delta i, \Delta j, \Omega_s^\uparrow, \Omega_v^\downarrow)$  et  $FT_{BA-Sensor}(\Delta i, \Delta j, \Omega_s^\uparrow, \Omega_v^\downarrow)$  pour la rétrodiffusion atmosphérique vers les couches BA et Capteur, et  $FT_{BA-FL}^{scat}(\Delta i, \Delta j, \Omega_s^\uparrow, \Omega_v^\downarrow)$  pour le transfert montant au niveau FL.
- Fonctions de transfert "absorption" :  $FT_{HA}^{abs}(n, \Omega_s^\uparrow), FT_{MA}^{abs}(n, \Omega_s^\uparrow)$  : énergie absorbée par couche n des zones MA et HA.

En fait,  $FT_{BA-FL}^{dir}$  est une matrice diagonale, alors que  $FT_{BA-BA}$ ,  $FT_{BA-FL}^{tot}$  et  $FT_{BA-FL}^{scat}$  sont des matrices dont la dimension peuvent atteindre des valeurs ingérables (e.g.,  $10^{11}$  si  $\Delta i = \Delta j = 10^3$  avec  $10^2$  directions montantes et descendantes et 10 bandes spectrales). Ici, ce problème est résolu par le calcul d'expressions simplifiées de  $TF_{BA-FL}^{scat}$ . Pour cela, chaque FT est approchée par un jeu de 2 distributions : la distribution spatiale  $W(\Delta i, \Delta j)$  de l'énergie totale localement interceptée par FL et la distribution angulaire  $FT(\Omega_s^\uparrow, \Omega_v^\downarrow)$ , spatialement constante, du flux qui atteint FL. Ainsi, pour la couche FL (TOA ou Capteur) :

$$FT_{BA-FL}^{scat}(\Delta i, \Delta j, \Omega_s^\uparrow, \Omega_v^\downarrow) \equiv \{W_{BA-FL}^{scat}(\Delta i, \Delta j), FT_{BA-FL}^{scat}(\Omega_s^\uparrow, \Omega_v^\downarrow)\}$$

$$\text{avec } W_{BA-FL}^{scat}(\Delta i, \Delta j) = \sum_s \sum_v TF_{BA-FL}^{scat}(\Delta i, \Delta j, \Omega_s^\uparrow, \Omega_v^\downarrow)$$

$$\text{et } FT_{BA-FL}^{scat}(\Omega_s^\uparrow, \Omega_v^\downarrow) = \frac{\sum_i \sum_j FT_{BA-FL}^{scat}(\Delta i, \Delta j, \Omega_s^\uparrow, \Omega_v^\downarrow)}{\sum_i \sum_j FT_{BA-FL}^{scat}(\Delta i, \Delta j, \Omega_s^\uparrow, \Omega_v^\downarrow)}$$

Cette expression simplifiée de  $TF_{BA-FL}^{scat}$  est valide, car sa distribution angulaire a une dépendance spatiale beaucoup plus faible que  $W_{BA-FL}^{scat}$ , ce qui est en général le cas.

#### • Transfert radiatif dans le système Terre - Atmosphère

\* Etape 1 (Figure 3) : Eclairage de la scène terrestre à travers l'atmosphère. Cette étape a 2 phases. Seule la 1<sup>ère</sup> dépend du mode de DART.

- Phase 1: Pour les modes DART "R" et "R+T", le flux solaire direct se propage à travers HA et MA. L'énergie interceptée dans HA et MA est stockée pour une diffusion ultérieure.

Pour les modes DART "T" et "R+T", les flux émis par HA et MA sont interceptés (i.e., diffusion ultérieure) dans MA et HA, ou sortent via la couche "TA" ou la couche "BA".

- Phase 2: diffusion itérative de l'énergie interceptée par HA et MA. Durant la Phase 1 et durant les itérations suivantes. Dans l'IRT, la faible diffusion atmosphérique explique une quasi convergence avec une seule itération (i.e., diffusion d'ordre 1).

Avec  $TF_{MA-HA}$  et  $TF_{MA-BA}$ , nous obtenons les luminances au niveau BOA (i.e.,  $E_{BOA}(\Omega^\downarrow)$ ), au niveau du capteur (i.e.,  $E_{Capteur}(\Omega^\downarrow)$  et  $E_{Capteur}(\Omega^\downarrow)$ ), et au niveau TOA (i.e.,  $E_{TOA}(\Omega^\uparrow)$ ), ce qui donne la réflectance atmosphé-

rique au niveau du capteur  $\rho_{atm, Capteur}(\Omega_s, \Omega_v)$  et au sommet de l'atmosphère  $\rho_{atm, TOA}(\Omega_s, \Omega_v)$ .

\* Etape 2 : T.R. dans la scène terrestre et dans l'air présent (couche BA). Les rayons montants incidents sur la couche "BA" sont stockés dans une couche sur échantillonnée. Ce calcul est réalisé avec un nombre donné d'itérations, suivi par une extrapolation.

\* Etape 3 : Rétrodiffusion atmosphérique des flux montants diffusés à l'étape 2. Pour réduire le temps calcul, elle est calculée comme la convolution des flux montants au sommet de BA avec  $FT_{BA-BA}$  ou  $FT_{BA-Capteur}$  :

$$W_{BOA}(i', j', \Omega^\downarrow) = \sum_i \sum_j \sum_{\Omega^\uparrow} W_{BOA}(i, j, \Omega^\uparrow) \cdot TF_{BA-BA}(\Delta i, \Delta j, \Omega^\uparrow, \Omega^\downarrow)$$

$$W_{Cap}(i', j', \Omega^\downarrow) = \sum_i \sum_j \sum_{\Omega^\uparrow} W_{BOA}(i, j, \Omega^\uparrow) \cdot TF_{BA-Cap}(i, j, \Omega^\uparrow, \Omega^\downarrow)$$

\* Etape 4 : T.R. dans la scène terrestre des flux rétrodiffusés à l'étape 3. Ce calcul réalisé sur une itération est extrapolé avec les coefficients d'extrapolation déduits de l'étape 3.

\* Etape 5 : Flux montant aux niveaux TOA du Capteur :

$$W_{TOA}(i', j', \Omega^\uparrow) = \sum_i \sum_j \sum_{\Omega^\uparrow} W_{BOA}(i, j, \Omega^\uparrow) \cdot TF_{BA-TOA}(\Delta i, \Delta j, \Omega^\uparrow, \Omega^\uparrow)$$

$$W_{Cap}(i', j', \Omega^\uparrow) = \sum_i \sum_j \sum_{\Omega^\uparrow} W_{BOA}(i, j, \Omega^\uparrow) \cdot TF_{BA-Cap}(i, j, \Omega^\uparrow, \Omega^\uparrow)$$

Energie absorbée dans la couche atmosphérique n :

$$W_{FL}^{abs}(n) = \sum_i \sum_j \sum_s W(i, j, \Omega_s^\uparrow) \cdot TF_{FL}^{abs}(n, \Omega_s^\uparrow) \text{ où } FL=MA \text{ ou } HA$$

### III. VALIDATION DU MODELE

#### A. Sensibilité à l'échantillonnage spatial et directionnel

De manière logique, un meilleur échantillonnage spatial de l'atmosphère et des directions de propagation des flux améliore la précision de DART, mais augmente les temps de calcul. Les simulations réalisées permettent de vérifier que la précision de DART converge pour un certain niveau d'échantillonnage. De plus, elles montrent que les niveaux d'échantillonnage requis sont tout à fait acceptables en terme de temps calcul. Ainsi, la Figure 4 illustre la variation de la précision relative des réflectances DART d'ordre 1 avec l'échantillonnage de l'atmosphère (1, 8, 40 et 80 cellules) et des directions (10, 20, 50 et 100 directions), dans le cas d'une atmosphère gazeuse non absorbante (épaisseur optique  $\tau_m = 2$ , angle solaire zénithal  $\theta_s = 50$ ). L'erreur relative devient faible pour des nombres relativement petits de directions et de cellules verticales. Il apparaît que le nombre de cellules est le facteur prédominant.

Nb cellules →	1	8	40	80
Nb directions ↓				
10	58,97%	9,84%	1,19%	0,90%
20	59,09%	9,50%	0,89%	0,62%
50	58,57%	9,43%	0,67%	0,51%
100	58,41%	9,36%	0,60%	0,48%

Figure 4 : Précision relative des réflectances DART d'ordre 1 selon l'échantillonnage de l'atmosphère (nombre de cellules verticales) et des directions

#### B. Comparaison avec un modèle analytique

• *Atmosphère gazeuse non diffusante*

La réflectance TOA d'une atmosphère non diffusante d'épaisseur optique  $\tau_m$  au dessus d'un sol de réflectance lambertienne  $\rho_{sol}$ , avec des angles zénithaux solaires  $\theta_s$  et de visée  $\theta_v$  est :

$$\rho_{TOA}(\theta_s, \theta_v) = T(\theta_s) \cdot \rho_{sol} \cdot T(\theta_v) \text{ avec } T(\theta) = \exp\left[-\frac{\tau_m}{\cos\theta}\right]$$

Avec  $\{\rho_{sol}=0.1, \tau_m=0.8\}$ , l'erreur DART relative est  $<0.02\%$  pour  $\theta_s=0^\circ$  et  $<0.03\%$  pour  $\theta_s=50^\circ$ .

• *Atmosphère gazeuse non absorbante*

La réflectance TOA d'ordre 1 d'une atmosphère non absorbante est :

$$\rho_{TOA}(\theta_s, \theta_v) = \frac{\mu_s}{4(\mu_s + \mu_v)} \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{\tau_d}{\mu_s} + \frac{\tau_d}{\mu_v}\right] - 1 \right\} \cdot P(\Omega_s, \Omega_v) \cdot \tau_d$$

avec  $\mu_s = \cos\theta_s$  et  $\mu_v = \cos\theta_v$ ,  $\tau_d$  l'épaisseur optique atmosphérique, et P la fonction de phase de Rayleigh :

$$P(\Omega_s, \Omega_v) = 0.7552 + 0.7345 \cdot \cos^2 \Psi_{sv}$$

Les simulations montrent que même avec des configurations peu exigeantes (e.g., {80 layers; 120 directions}) en terme de temps calcul, l'erreur relative DART est faible ( $<0.6\%$ ) et compatible avec les applications de télédétection spatiale. Par exemple, la Figure 5 montre que les erreurs relatives DART avec 120 directions où  $\{\theta_v \in [-83^\circ +83^\circ], \varphi_v=0, \theta_s=\{0^\circ;50^\circ\}\}$ , une épaisseur optique atmosphérique  $\tau_m=\{0;0.5;2\}$  et 80 cellules verticales :

	$\tau = 0.05$	$\tau = 0.5$	$\tau = 2$
$\theta_s=0$	0.5%	0.5%	0.53%
$\theta_s=50$	0.45%	0.47%	0.48%

Figure 5: Erreur relative des réflectances DART d'ordre 1, avec différents angles solaires et épaisseurs optiques atmosphériques.

C. *Comparaison avec les modèles ModTran et Coulson*

La précision de la réflectance dépend des diffusions d'ordre 1, mais aussi des diffusions multiples. La précision de la modélisation DART des diffusions multiples a été testée par comparaison avec un jeu de réflectances atmosphériques TOA calculées avec le modèle ModTran [7], en utilisant la modélisation Coulson [12] en tant que référence.

La Figure 6 montre l'écart relatif DART/ModTran moyenné sur l'angle zénithal de visée pour 27 atmosphères gazeuses.

$[\tau_m=0.5, \rho_{sol}=0, \theta_s=\{23.07^\circ 53.13^\circ 78.46^\circ\}, \varphi_s=\{0^\circ 90^\circ 180^\circ\}]$

$[\tau_m=0.5, \rho_{sol}=0.25, \theta_s=\{0^\circ 36.87^\circ 66.42^\circ\}, \varphi_s=\{0^\circ 90^\circ 180^\circ\}]$

$[\tau_m=0.1, \rho_{sol}=0.25, \theta_s=\{0^\circ 36.87^\circ 66.42^\circ\}, \varphi_s=\{0^\circ 90^\circ 180^\circ\}]$

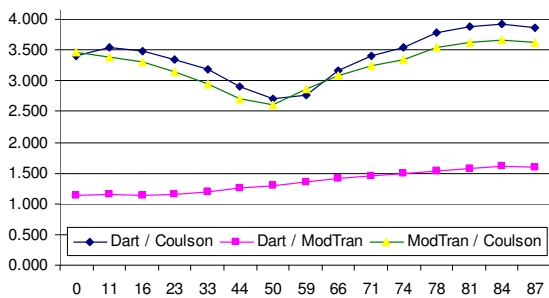


Figure 6 : Erreur relative moyenne (valeur absolue) DART / ModTran, ModTran / Coulson, DART / Coulson, sur l'angle zénithal de visée, pour 6 angles solaires et 3 épaisseurs optiques.

Comparé à Coulson, la précision de DART est similaire à celle de ModTran (erreur relative moyenne : 3.3%). Par rapport à ModTran, la précision de DART est  $\approx 1.3\%$ , ce qui est satisfaisant pour la plupart des études concernant le transfert radiatif dans le système "Terre – Atmosphère". Ici, une simulation DART requiert  $\approx 10$  s avec un PC à 2.8GHz. D'une manière générale, la précision est inversement proportionnelle à l'échantillonnage de l'atmosphère.

La Figure 7 illustre comment le nouvel algorithme de transfert radiatif atmosphérique améliore la précision de DART. Il montre la précision des versions 4 (avec le nouvel algorithme) et 3 (sans le nouvel algorithme) de DART en fonction de l'angle zénithal de visée, en utilisant le modèle ModTran comme référence. Ici, les simulations ont été réalisées avec une atmosphère gazeuse, un sol lambertien ( $\rho = 0.25$ ). D'une manière générale, la précision relative de DART a été améliorée de 6.5% à 1.3%.

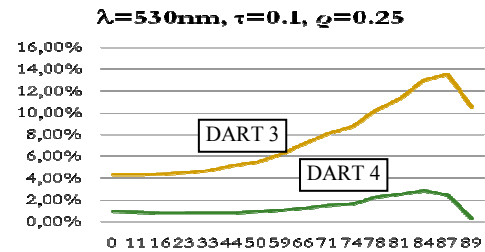


Figure 7: Précision relative des réflectances simulées avec DART 3 et 4. Le modèle ModTran est la référence.

D. *Exemples de simulations DART avec T.R. atmosphérique*

La modélisation du T.R. atmosphérique permet de simuler les quantités radiométriques atmosphériques majeures. Ceci est illustré ici avec 2 types de quantités :

- *luminances atmosphériques descendantes* (Figure 8).

- profil vertical d'absorption gazeuse. La Figure 11 montre le profil exponentiel du CO<sub>2</sub> et le profil de O<sub>3</sub> avec un maximum vers 25km d'altitude.

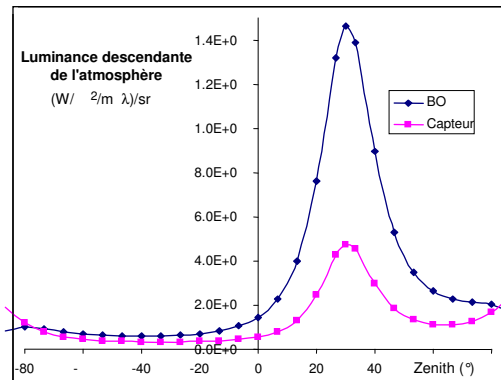


Figure 8 : Luminance atmosphérique descendante BOA et Capteur dans le plan principal.  $\theta_s=30^\circ, \lambda=500nm, \rho_{sol}=0.5$ . Modèle de gaz "Mid-latitude summer" ( $\tau_m = 0.15, H_m=8.8km$ ) et mo-

dèle d'aérosols "Rural" ( $\tau_p=23\text{km}$ ,  $\tau_p=0.372$ ,  $H_p=2\text{km}$ ,  $\omega_p=0.982$ ,  $g_{1p}=0.79$ ,  $g_{2p}=0.4$ ,  $a_p=0.95$ ). L'éclairement solaire BOA est  $9.2 \cdot 10^8 \text{ W / m}^2 / \text{m}$ . L'éclairement total BOA est  $16.3 \cdot 10^8 \text{ W / m}^2 / \text{m}$ . Au niveau "Capteur" l'éclairement solaire direct est  $13.5 \cdot 10^8 \text{ W / m}^2 / \text{m}$ , alors que l'éclairement total est  $16.1 \cdot 10^8 \text{ W / m}^2 / \text{m}$ .

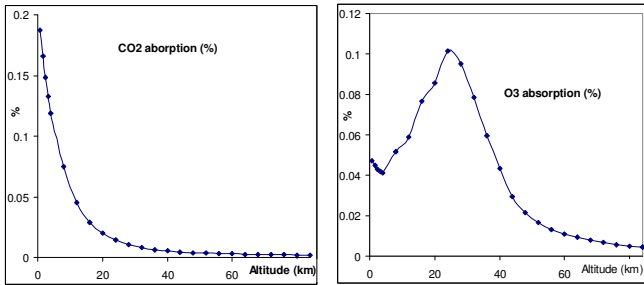


Figure 9 : Profils verticaux d'absorption atmosphérique.  
a)  $\text{CO}_2$  ( $\lambda=13\mu\text{m}$ ). b)  $\text{O}_3$  ( $\lambda=9.64 \mu\text{m}$ ). Modèle de gaz "Mid-latitude summer".

En fait, l'intérêt majeur de DART est de modéliser avec précision le T.R. dans le système "Terre - atmosphère" pour simuler de manière très précise les mesures de télédétection, en particulier sous forme d'images. Ceci est illustré ici avec plusieurs simulations DART.

La composition colorée DART (Figure 10) de la forêt Howland [10] a été réalisée avec 3 images DART simulées dans les bandes spectrales du bleu, du vert et du rouge, pour une direction de visée au nadir. Le zoom d'une partie de l'image illustre la capacité de DART à simuler avec précision les effets d'ombre au sein des couverts végétaux. La

Figure 10 montre aussi 4 spectres simulés par DART pour 2 altitudes (BOA et TOA) et pour 2 directions de visée (nadir et hot spot). De manière logique, ces spectres font apparaître une beaucoup plus forte réflectance pour la direction d'observation du hot spot que pour la direction du nadir. Les spectres associés aux mesures TOA ont une forme discontinue due aux bandes d'absorption gazeuses de l'atmosphère. La diffusion des gaz et aérosols explique les fortes réflectances dans les domaines spectraux du bleu et du vert.

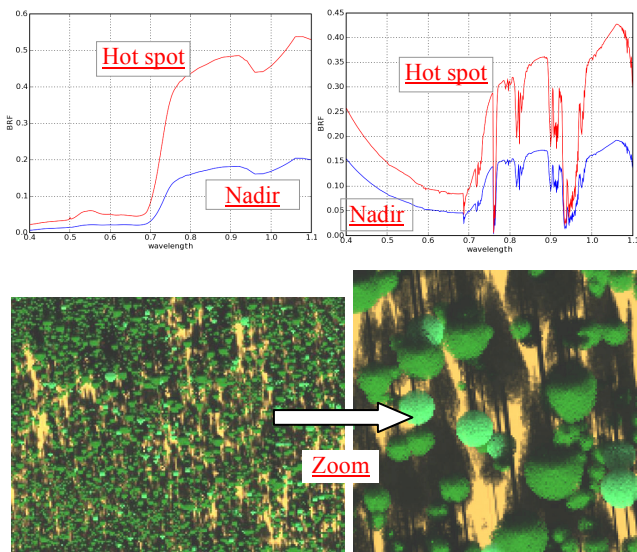


Figure 10: Forêt Howland. Image DART et zoom (a). Spectres BOA (b) et TOA (c) pour les directions 'nadir' et 'hot spot'.

La Figure 11 montre une composition colorée DART du quartier St Sernin de Toulouse (France). La maquette de la ville a été importée à partir de la base de données urbaine de la ville de Toulouse. Les images DART font bien apparaître l'impact de l'atmosphère sur les images de télédétection. Ainsi, l'image qui correspond aux vraies configurations d'acquisition, c'est-à-dire en présence d'atmosphère (Figure 11.c) a une teinte bleutée due à la diffusion atmosphérique, contrairement à l'image simulée en l'absence d'atmosphère (Figure 11.b).

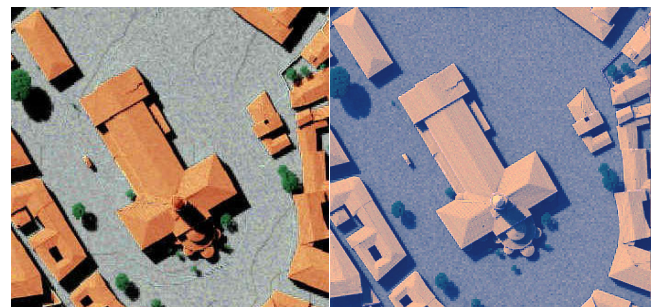


Figure 11 : Composition colorée DART du quartier Saint Sernin à Toulouse. Les images du bas sont des simulations d'images acquises en l'absence d'atmosphère (gauche) et avec de l'atmosphère (droite).

La modélisation intégrée du T.R. dans le système "Terre - Atmosphère" permet de prendre en compte l'hétérogénéité

spatiale de l'éclairage atmosphérique de couplage. Cet effet de couplage (ou effet d'environnement) est ici illustré à l'aide d'un paysage schématique constitué d'une bande de 2500m de réflectance 0.5 suivi d'une bande de 7500m de réflectance nulle (infiniment large). Il est considéré une atmosphère sans aérosols, d'épaisseur optique de diffusion gazeuse  $\tau_m = 0.42$  et de transmittance  $T = 0.945$ . Le soleil est au zénith et le capteur (TOA) au nadir. Le SKYL (fraction d'énergie diffusée par l'atmosphère) est 19.8%. La Figure 12.a montre l'image DART de cette bande ainsi que le profil horizontal des réflectances mesurées le long de cette bande.

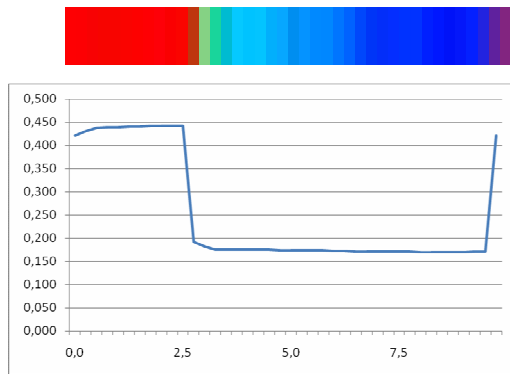


Figure 12 : Composition colorée DART du quartier Saint Sernin à Toulouse. Les images du bas sont des simulations d'images acquises en l'absence d'atmosphère (gauche) et avec de l'atmosphère (droite).

De manière logique, l'effet général de l'atmosphère diffuse est de diminuer la réflectance apparente de la bande de réflectance de surface 0.5 (teinte rouge), et d'augmenter la réflectance apparente de la bande de réflectance nulle (teinte bleue). D'autre part, la variation des teintes au sein de chaque bande illustre la variabilité des effets d'environnement au sein d'une même bande. Ainsi, la réflectance varie de près de 10% (en relatif) entre le bord proche de la frontière et le milieu de la bande noire. L'apparition de cette variation n'est possible que parce que l'atmosphère peut être discrétisée avec une précision adaptée au milieu étudié.

#### 4. CONCLUSION

La modélisation DART du T.R. dans le système "Terre – atmosphère" a été améliorée avec 2 objectifs en vue :

- meilleure précision des images et bilan radiatif simulés.
- meilleure flexibilité du modèle.

La précision a été améliorée via l'emploi de fonctions de transfert atmosphérique, pour la phase d'illumination de la scène et aussi pour transformer les flux montants au niveau BOA en des flux aux niveaux TOA et Capteur. Ceci a nécessité de simplifier la fonction  $FT_{BA-FL}^{scat}(\Delta_i, \Delta_j, \Omega_s^\uparrow, \Omega_v^\uparrow)$  pour ne pas avoir à gérer de trop gros volumes d'information trop importants. Les comparaisons effectuées avec le modèle atmosphérique ModTran ont montré que la précision DART a été nettement améliorée. DART (6.5% à 1.3%)

La flexibilité de la modélisation du T.R. atmosphérique a été améliorée via l'introduction de la possibilité de spécifier à la fois des paramètres de la modélisation du T.R. (e.g., nombre d'itérations pour simuler les fonctions de transfert) et la géométrie (épaisseur, dimensions des cellules) des zones de l'atmosphère (BA, MA, HA).

Ces améliorations sont essentielles pour simuler de manière simple et précise à la fois des images de télédétection spatiale et le bilan radiatif des surfaces terrestres. Elles sont incluses dans la nouvelle version 4.1 de DART distribuée par l'université Paul Sabatier (<http://www.cesbio.upstlse.fr/fr/dart.htm>).

#### 5. REFERENCES

- [1] J.P. Gastellu-Etchegorry, V. Demarez, V. Pinel, F. Zagolski, "Modeling radiative transfer in heterogeneous 3-D vegetation canopies", Remote Sensing Environment. Elsevier. 58:131-156. 1996
- [2] Gastellu-Etchegorry J.P., Martin E., Gascon F., "DART: a 3D model for simulating satellite images and studying surface radiation budget", International Journal of Remote Sensing. Taylor & Francis. 25 (1):75-96. 2004.
- [3] Gastellu-Etchegorry J.P., 3D modeling of satellite spectral images - Radiation budget and energy budget of urban landscapes, Meteorology & Atmosphere Physics. Springer. 102(3):187-207. 2008
- [4] J.L. Widlowski, M. Robustelli, M. Disney, J.P. Gastellu-Etchegorry, T. Lavergne, P. Lewis, P.R.J. North, B. Pinty, R. Thompson and M.M. Verstraete, The RAMI On-line Model Checker (ROMC): A web-based benchmarking facility for canopy reflectance models, Remote Sensing of Environment. Elsevier. 112:1144-1150. 2008,
- [5] Gascon, F. "Modélisation physique d'images de télédétection optique". PhD Thesis. Université Paul Sabatier, 2001.
- [6] Kotchenova S.Y., Vermote E.F., Levy R., Lyapustin A. "Radiative Transfer Codes for Atmospheric Correction and Aerosol Retrieval: Intercomparison Study", Applied Optics. Optical Society America. 47 (13): 2215-2226. 2008.
- [7] Berk A., Bernstein, "MODTRAN: a moderate resolution model for LOWTRAN 7", Bedford Geophysics Lab, 1989.
- [8] K. L. Coulson, J. V. Dave, and Z. Sekera, "Tables related to radiation emerging from a planetary atmosphere with Rayleigh scattering", University of California Press, 1960.
- [9] G. Sun, J. Rubio, K.J. Ranson, D. Kimes, B. Koetz and J.P. Gastellu-Etchegorry, Fusion of Multi-sensor Data for Forest Structural Parameter Retrieval using 3D Radiative Transfer Modeling. In, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'09). Capetown, South Africa. 2009.