



DART : modèle physique 3D d'images de télédétection et du bilan radiatif de paysages urbains et naturels

Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry, Yves Auda, Emmanuel Martin, Aurore Brut, Valérie Demarez, Eloi Grau, J. Rubio, Nathalie Benech, Christophe Suere, Pierre-Adrien Solignac, et al.

► To cite this version:

Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry, Yves Auda, Emmanuel Martin, Aurore Brut, Valérie Demarez, et al.. DART : modèle physique 3D d'images de télédétection et du bilan radiatif de paysages urbains et naturels. *Teledetection*, 2008, 8 (3), pp.159-167. ird-00404958

HAL Id: ird-00404958

<https://ird.hal.science/ird-00404958>

Submitted on 17 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.

DART : MODÈLE PHYSIQUE 3D D'IMAGES DE TÉLÉDÉTECTION ET DU BILAN RADIATIF DE PAYSAGES URBAINS ET NATURELS

Jean-Philippe GASTELLU-ETCHEGORRY¹, Yves AUDA¹, Emmanuel MARTIN², Aurore BRUT¹, Valérie DEMAREZ¹, Eloi GRAU¹, Jérémie RUBIO¹, Nathalie BENECH¹, Christophe SUERE¹, Pierre Adrien SOLIGNAC¹, Antoine GROUSSOUS¹, Alice BELOT³, Patrice HENRY³, Vincent BERNAT², Guillaume PRECHEUR²

¹ Université de Toulouse ; UPS, CNRS, CNES, IRD ; CESBIO (Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère) ; 18 Av. Edouard Belin, 31401 Toulouse, France, gastellu@cesbio.cnes.fr, www.cesbio.ups-tlse.fr

² Magellium, 24 rue Hermès - BP 12113, 31521 Ramonville Saint-Agne cdx - France, emmanuel.martin@magellium.fr, www.magellium.fr

³ Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), 18 avenue E.Belin, 31401 Toulouse, cdx 9, France

Soumis le 13 juin 2008, accepté le 17 novembre 2008 ; © Revue Télédétection, 2008, vol. 8, n° 3, p. 159 -167

Résumé

Le modèle DART (Discrete Anisotropic Radiative Transfer) simule le transfert radiatif optique dans le système "Terre - Atmosphère", du visible à l'infrarouge thermique, pour des paysages urbains et naturels (e.g., forêts multi-espèces), avec atmosphère et relief. Ses deux principales sorties sont :

- images de télédétection spatiale (i.e., réflectance ou température directionnels), pour toute direction solaire et de visée, altitude du capteur, résolution spatiale, etc.

- Bilan radiatif 3-D. ce bilan est utilisé pour simuler la photosynthèse ainsi que les bilans d'énergie et de masse des surfaces terrestres.

DART génère aussi des séries de simulations où certains paramètres (e.g., LAI, temps, longueur d'onde) varient, ce qui permet de créer des courbes spectrales et temporelles. De plus, il inverse les images de télédétection pour calculer certains paramètres biophysiques (e.g., LAI, taux de couverture).

DART simule les paysages en tant que matrices 3-D de cellules parallélépipédiques qui contiennent de la matière turbide et/ou des éléments de surface opaques ou translucides dotés de propriétés optiques isotropes (i.e., lambertien) ou non (e.g., spéculaire). Ces propriétés peuvent être spécifiées par des bases de données spectrales ou via le couplage de DART avec le modèle foliaire PROSPECT. Une interface graphique gère la simulation du paysage et l'affichage des résultats (e.g., images, spectres). Validé lors de l'expérience RAMI, puis breveté en 2003, DART est désormais un outil très utile pour analyser et interpréter les images de télédétection. Les scientifiques peuvent obtenir des licences gratuites auprès de l'Université Paul Sabatier.

Mots clés : télédétection spatiale, images, modélisation, transfert radiatif.

DART : A PHYSICAL 3D MODEL OF REMOTE SENSING IMAGES AND OF RADIATION BUDGET OF URBAN AND NATURAL LANDSCAPES

Abstract:

DART (Discrete Anisotropic Radiative Transfer) model simulates 3-D radiative transfer in the "Earth - Atmosphere" system from the visible to the thermal infrared domains ($0.3\mu\text{m}$ - $15\mu\text{m}$), for natural (e.g., forests with different tree

species) and urban landscapes, with / without topography and atmosphere. Its two major outputs are: - remote sensing images (directional reflectance and temperature) for any sun/view direction, altitude and spatial resolution. Data bases specify atmosphere and earth material parameters.

- 3-D radiation budget. This is used for simulating photosynthesis, energy and mass fluxes.

DART simulates landscapes as 3-D cell matrices with scene elements optical properties (reflectance, emissivity) either isotropic (lambertian) or not (specular,...). It is coupled with PROSPECT leaf model. It uses a friendly Graphic User Interface (GUI) to input parameters, to create/resample DEMs, to run multiple simulations, to display results,... Its accuracy was validated by the European Research Center (RAMI experiment). It was patented in 2003 and professionalized by CNES with Magellium. It is nowadays a useful tool for conducting remote sensing studies of Earth surfaces. Paul Sabatier University delivers free licenses to scientists.

Keywords : remote sensing, images, model, radiative transfer

I. INTRODUCTION

Les modèles de transfert radiatif (T-R) se différencient surtout par leur méthode mathématique de résolution et par leur modélisation du milieu de propagation. Ils sont souvent divisés en 2 catégories associées aux 2 types majeurs de modélisation du paysage. Les modèles "homogènes" (Idso et de Wit, 1970; Ross, 1981; Myneni et al. 1989, Verhoef, 1998; Gobron et al. 1997) représentent le paysage par un simple profil vertical d'éléments absorbants ou diffusants (feuilles). Par contre, les modèles "hétérogènes" représentent le paysage par une distribution spatiale non uniforme d'éléments du paysage (Li *et al.*, 1992-1995; North, 1996; Govaerts et Verstraete, 1998; Thompson et Goel 1998; Helbert et al., 2004). L'originalité du modèle DART (Discrete Anisotropic Radiative Transfer) est de simuler le T-R 3-D dans le système "Terre -Atmosphère" simultanément dans plusieurs longueurs d'onde sur tout le domaine optique, visible et infrarouge thermique inclus. Les paysages étudiés sont naturels (forêt, zone agricole, lac, etc.) et/ou urbains (immeubles, etc.), avec ou sans relief et atmosphère. Ils peuvent contenir plusieurs types (*i.e.*, propriétés optiques et géométriques) de végétation et de matériaux urbains. Les deux principaux produits simulés sont :

- **images (réflectance, température) de télédétection géoréférencées** : à toute altitude, du bas (avion) au sommet (satellite) de l'atmosphère, pour toute configuration expérimentale (résolution spatiale, directions solaire et de visée, atmosphère, etc.). Ces produits sont utiles pour l'inversion des images de télédétection et la conception des futurs capteurs satellitaires.

- **bilan radiatif de paysages 3-D** : distribution 3-D du rayonnement intercepté, absorbé et diffusé. Ce bilan est utilisé par le modèle DARTEB pour modéliser le fonctionnement de la végétation et des flux d'énergie et de masse (CO₂, H₂O, etc.) des couverts naturels et urbains.

La méthode de modélisation (brevet PCT/FR 02/01181) de DART combine le suivi des rayons, la méthode des ordonnées discrètes, une modélisation itérative des diffusions multiples et l'emploi de bases de données (propriétés optiques, physiques) de l'atmosphère et des milieux terrestres. Une interface graphique permet l'entrée des paramètres (angles d'observation et d'éclairement, caractéristiques du paysage, etc.) et la visualisation de la scène simulée (vue 3D, coupes) et les simulations (images, bilan radiatif, réflectance/température). La précision de DART a été vérifiée avec des mesures terrain et le projet RAMI de comparaison de modèles (Pinty *et al.*, 2001; Pinty *et al.*, 2004; Widlowski *et al.*, 2007).

Ce papier introduit les principes majeurs de DART pour modéliser les paysages et le transfert radiatif, et par suite pour simuler les images de télédétection et le bilan radiatif 3D.

II. MODÉLISATION DES PAYSAGES

● *Discretisation spatiale du paysage*

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

La scène est constituée par la maquette du paysage terrestre, surmontée d'une atmosphère si le T-R atmosphérique est simulé. La maquette "atmosphère" comprend uniquement des 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). Le paysage terrestre a des dimensions DX, DY et DZ selon les axes Ox, Oy et Oz. Il peut être simulé à partir de documents cartographiques (*i.e.*, cartes d'occupation du sol). Ses cellules ont

des dimensions "libres" (ΔX , ΔY , ΔZ), où ΔZ peut différer de ΔX et ΔY pour optimiser l'échantillonnage spatial (vertical vs. horizontal) du paysage et un indice qui indique le type de milieu qu'elles contiennent.

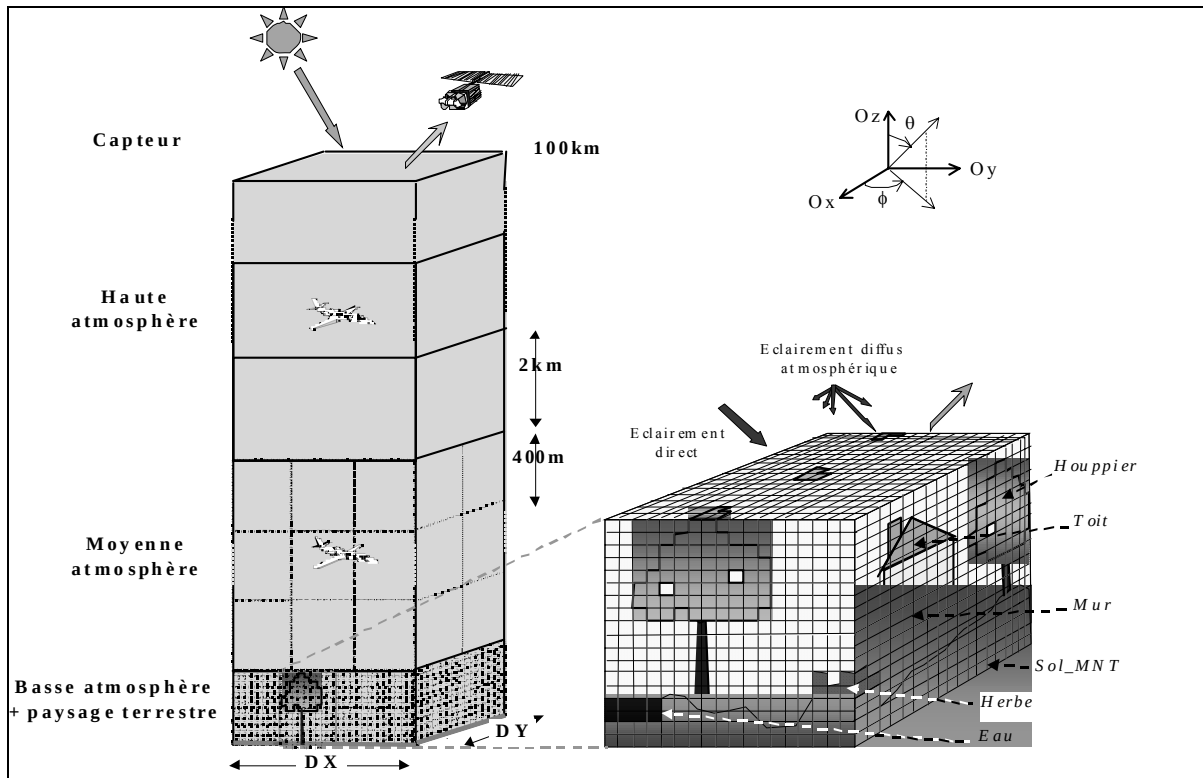


Figure 1: Représentation schématique du système "Paysage terrestre - Atmosphère".

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 et 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 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.

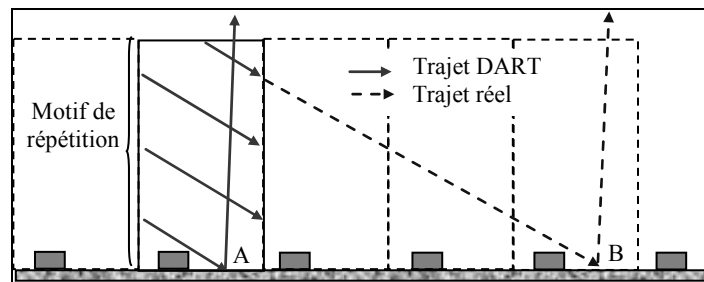


Figure 2: Suivi de rayons dans un paysage infini répétitif (Gascon, 2001).
Trajet réel et trajet simulé dans la maquette DART. Les points A et B sont équivalents.

• Types de paysages

DART opère sur des paysages naturels et urbains avec ou sans atmosphère et relief. 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 par la juxtaposition de cellules remplies de matière turbide, c'est-à-dire un gaz d'éléments foliaires plans petite dimension ($d_f \ll \Delta X, \Delta Y, \Delta Z$) et dont la distribution spatiale suit la loi de Poisson, avec une densité volumique u_f , une distribution angulaire des normales (LAD) 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 par la juxtaposition d'éléments opaques plans (*i.e.* triangles, parallélogrammes) caractérisés par des propriétés optiques (réflectance ρ , transmittance τ), une orientation et des dimensions spécifiques. Il en résulte qu'il existe 3 types de cellules :

1) **Cellules "turbides"** (feuilles des houppiers d'arbre, rameaux et brindilles, cultures, herbe, air). Elles induisent des interactions volumiques qui sont modélisées avec un coefficient d'extinction, une fonction de phase et un albédo volumiques, déduits des propriétés structurales (u_f , LAD) et optiques (ρ , τ) des éléments du milieu.

2) **Cellules "opaques"** (sol, eau, route, murs, toits, troncs d'arbre et branches). Elles induisent des diffusions (réflectance ρ_{ad}) et émissions (émissivité : $1 - \rho_{ah}$) de surface simulés par des fonctions analytiques associées à 3 types de diffusion (lambertien, spéculaire, Hapke).

3) **Cellules "mixtes"** : Elles peuvent contenir plusieurs types de milieux turbides (*i.e.*, différentes espèces végétales) et/ou plusieurs figures planes. Elles sont bien adaptées à la simulation de couverts (*e.g.*, forêts boréales) avec un très fort niveau d'agrégation (aiguilles/rameaux/branches/houppier).

L'atmosphère (**Figure 1**) est modélisée par la superposition de 3 matrices de cellules "air" :

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

b) Moyenne atmosphère (MA) : de BA à 4km. $\{\Delta X_{MA} = \Delta X, \Delta Y_{MA} = \Delta Y\} < 100m$. $\Delta Z_{MA} = 400m$. Si la hauteur maximale du paysage terrestre dépasse 4km, l'atmosphère est simulée en décalant verticalement les matrices MA et HA sans modifier la taille de leurs cellules.

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 $\Delta Z_{BA} = \Delta Z$.

Des profils verticaux de coefficients d'extinction, d'absorption et de diffusion des aérosols et gaz définissent les propriétés optiques atmosphériques (Gascon, 2001). Ils sont calculés à partir des profils des gaz et aérosols atmosphériques prédéfinis ou fournis par l'opérateur.

La création des scènes (*i.e.*, parcellaire agricole, milieux urbains, etc.) est détaillée dans Handbook (2007). Seul, le mode de création des arbres est décrit ici.

● Modélisation des arbres

La modélisation d'un paysage arboré inclue la distribution spatiale et le descriptif des arbres.

- Distribution spatiale des arbres

- 🚩 **Option 1 : Lieu et dimensions exacts stockés dans un fichier texte.** Les caractéristiques de chaque arbre sont fixées : espèce (j), position (x,y), hauteurs du tronc et diamètres sous et à l'intérieur du houppier, dimensions et forme du houppier.
- 🚩 **Option 2 : Lieu exact et dimensions aléatoires.** Les paramètres structuraux sont définis par des variables gaussiennes. Un fichier stocke la position (x,y) de chaque arbre.
- 🚩 **Option 3 : Lieu et dimensions aléatoires.** Pour toute espèce (j), les dimensions du tronc et de la couronne ainsi que la probabilité d'occurrence aux nœuds d'une grille sont des variables gaussiennes {moyenne, $\square$ }.

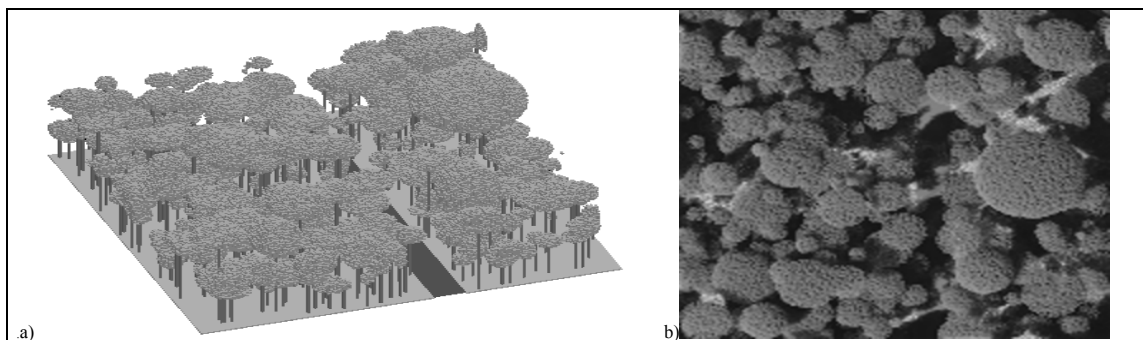


Figure 3: a) Simulation de forêt (option 1). b) Image DART. $\theta_v=0^\circ$, $\theta_s=30^\circ$. 100x100 cellules.

- Architecture des arbres

Tout arbre comprend un tronc et une couronne constituée d'un ou plusieurs niveaux de hauteur variable pour représenter la distribution verticale de l'indice foliaire (LAI). Le tronc sous et dans le houppier a un diamètre $\varnothing(z)$ et des propriétés optiques spécifiques. 5 formes (ellipsoïde, cône, trapézoïde, ...) de houppiers sont pré définies (Figure 4). Les éléments (brindilles, feuilles, trous, etc.) des houppiers peuvent être distribués horizontalement pour simuler

l'agrégation et différentes zones de défoliation. Les branches directement issues du tronc) sont simulées comme des objets 3-D de forme pyramidale.

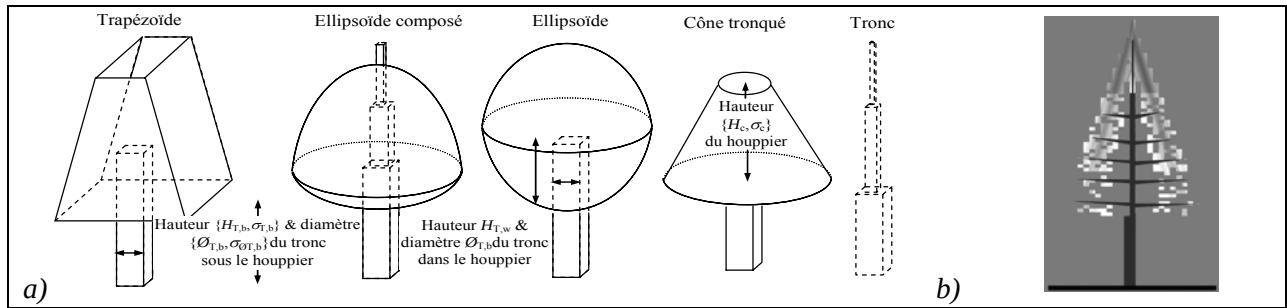


Figure 4 : a) Formes schématiques 3-D de troncs et de houppiers. b) Maquette d'arbre.

Les figures 5, 6, 7 et 8 illustrent la capacité de DART à simuler différents types de paysage, à la fois naturels et urbains. De plus, les conditions expérimentales varient avec la simulation du relief, la simulation d'images en bas et en haut de l'atmosphère, etc.

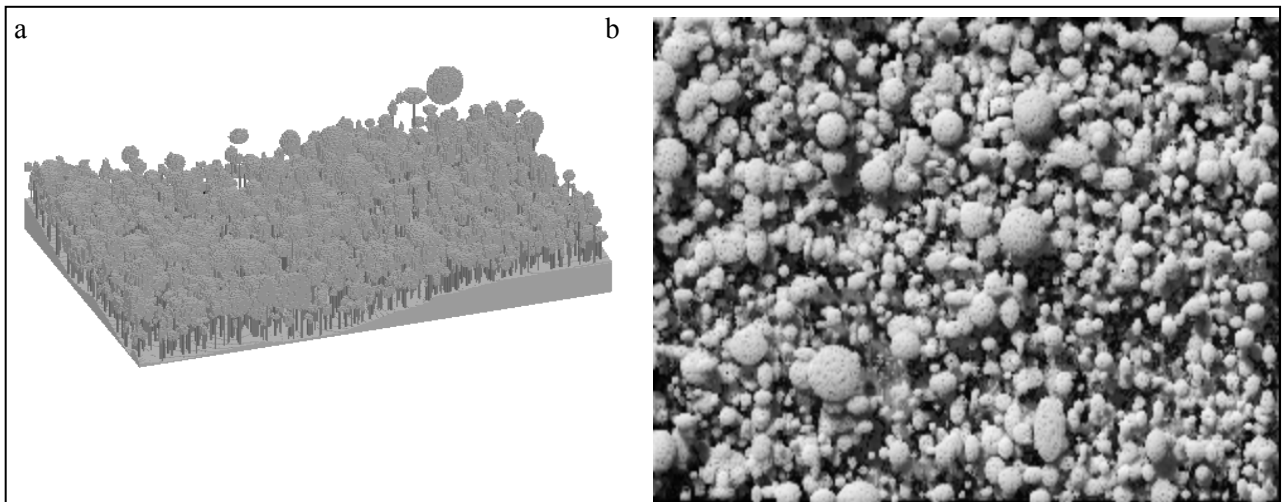


Figure 5 : a) Maquette de forêt tropicale. b) Simulation DART d'image de télédétection.

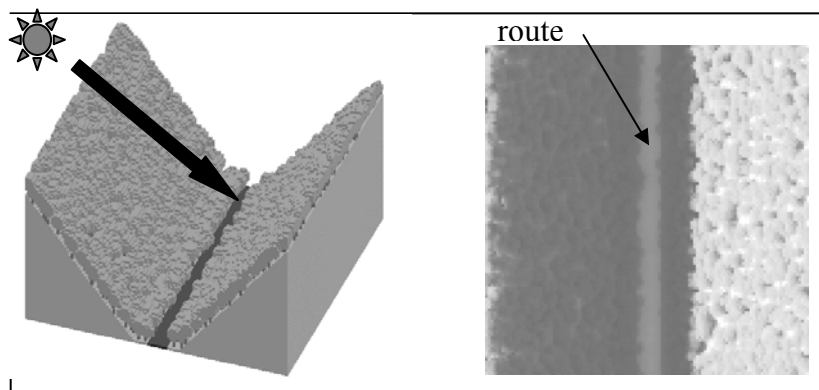
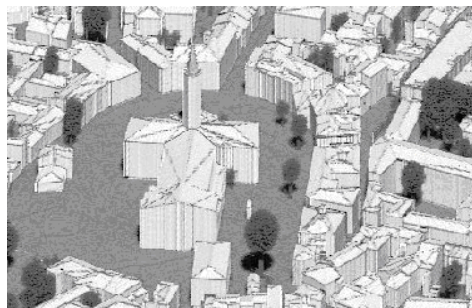


Figure 6 : a) Maquette de vallée. b) Simulation DART d'image de télédétection.

Simulation réalisée dans le cadre de la préparation du système Pléiades du CNES.



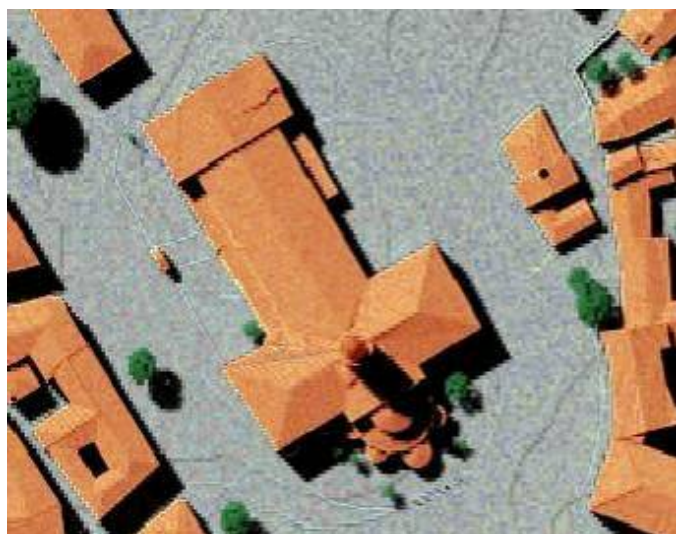


Figure 7 : Images DART du quartier St Sernin de Toulouse (France).

- a) Images nadir et oblique dans le proche infrarouge. b) Composition colorée de 3 simulations DART dans le bleu, le vert et le rouge.
c) Simulations DART de la basilique St Sernin au bas (gauche) et au sommet (droite) de l'atmosphère.

III. MODÉLISATION DU TRANSFERT RADIATIF

Le modèle DART comprend 4 modules majeurs. Le module "direction" divise l'espace 4π de propagation du rayonnement en secteurs angulaires. Le module "maket" construit la scène. Le module "phase" pré calcule certaines propriétés optiques des éléments du paysage pour réduire les calculs répétitifs au sein du module "dart" qui simule le transfert radiatif dans la scène.

L'équation générale (Hapke, 1993) de DART donne le taux de variation au lieu r par unité de déplacement dr selon la direction Ω de l'intensité monochromatique $I(r, \Omega)$ ($\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$) :

$$\frac{dI(r, \Omega)}{dr} = \left[\xi \frac{d}{dx} + \eta \frac{d}{dy} + \mu \frac{d}{dz} \right] I(r, \Omega) = -\alpha(r, \Omega) \cdot I(r, \Omega) + \int_{4\pi} \alpha(r, \Omega') \cdot \omega(r, \Omega') \cdot \frac{P(r, \Omega' \rightarrow \Omega)}{4\pi} \cdot I(r, \Omega') \cdot d\Omega' + \alpha_a(r, \Omega) \cdot I_b(r, T)$$

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

$\alpha(r, \Omega)$ [m^{-1}] est le coefficient d'extinction total : 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 flux incident selon la direction (Ω') et diffusés dans l'angle solide unité centré sur (Ω).

$\omega(r, \Omega) = \frac{\alpha_d(r, \Omega)}{\alpha(r, \Omega)} = 1 - \frac{\alpha_a(r, \Omega)}{\alpha(r, \Omega)}$ est l'albédo de diffusion. $\frac{P(r, \Omega' \rightarrow \Omega)}{4\pi}$ est la fonction de phase normalisée : fraction du flux intercepté selon (Ω') et diffusé par unité d'angle solide selon (Ω). Les 2^{es} termes de l'équation englobent les processus d'interception sur tout le domaine optique. Le 1^{er} terme est l'atténuation du flux (Ω), due à l'absorption et à la diffusion " $\Omega \rightarrow 4\pi$ ". Le 2^{ème} terme est la diffusion du flux selon (Ω) due à la diffusion des flux provenant de toutes les directions de l'espace. Le 3^{ème} terme est l'émission thermique : $I_b(r, T)$ est l'intensité de l'onde émise au point r par m^2 efficace de corps noir de température T .

DART a 3 modes de fonctionnement, pour toute longueur d'onde $\lambda \in [0.3\mu\text{m} - 15\mu\text{m}]$.

✚ Mode (R): réflectances. La seule source de rayonnement est le soleil.

✚ Mode (T): températures de brillance. Les sources sont {paysage terrestre + atmosphère}.

✚ Mode (T+R): températures de brillance. Les sources d'énergie sont {paysage terrestre + atmosphère + soleil}. Ce mode est bien adapté au domaine spectral [$3\mu\text{m} - 5\mu\text{m}$].

Chaque mode peut être réalisé avec transfert radiatif atmosphérique, ou avec un éclairage atmosphérique qui peut être isotrope (SKYL_λ) ou anisotrope ($L_{\text{BOA}, \lambda}(\Omega)$).

IV. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

DART a été récemment professionnalisé par la société Magellium, avec le soutien du CNES. Ses plus récentes améliorations sont l'insertion de

- modèle foliaire PROSPECT (Jacquemoud et Baret, 1990),
- modèle de création / ré-échantillonnage des MNT
- module pour lancer un grand nombre de simulations avec des paramètres d'entrée variables.
- module de création de LUT (table de réflectance / températures spectrales simulées).
- module d'inversion d'images de télédétection (Gastellu-Etchegorry *et al.*, 2003).

Les développements majeurs en cours concernent l'amélioration de l'IHM et le couplage avec des modèles 3D de représentation réaliste de cultures (*e.g.*, blé, maïs, etc.).

DART constitue désormais pour le domaine de la télédétection optique un modèle de référence efficace, robuste et facile à utiliser. Il est de plus en plus utilisé par les centres qui développent et utilisent la télédétection spatiale : NASA (Etats Unis), ESA (Europe), etc. L'Université Paul Sabatier le distribue gratuitement pour des applications purement scientifiques (CNES, NASA, ESA, Université de Wageningen, etc.).

Références :

- Gascon F., Gastellu-Etchegorry J.P., Lefèvre M.J., 2001. Radiative transfer Model for Simulating High-Resolution Satellite Images. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 39 (9): 1922-1926.
- Gastellu-Etchegorry J.P., Demarez V., Pinel V., Zagolski F., 1996. Modeling radiative transfer in heterogeneous 3-D vegetation canopies, *Remote Sensing Environment*, 58, 131-156.
- Gastellu-Etchegorry J.P., Martin E., Gascon F., 2004. DART: a 3-D model for simulating satellite images and surface radiation budget, *Int. Journal Rem. Sensing*, 25 (1): 75-96.
- Gastellu-Etchegorry J.P., Gascon F. et Estève P., 2003, An interpolation procedure for generalizing a look-up table inversion method, *Remote Sensing Environment*, 87: 55-71.
- Gobron N., Pinty B., Verstraete M.M. et Y.M. Govaerts, 1997. A semi-discrete model for the scattering of light by vegetation. *J. Geophys. Res.* 102(D8): 9431-9446.
- Govaerts Y. et M.M. Verstraete, 1998. Raytran: A Monte Carlo ray tracing model to compute light scattering in three-dimensional heterogeneous media. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 36(2):493-505.
- Handbook, 2007. <http://www.cesbio.ups-tlse.fr/fr/dart2.htm>
- Hapke, B., (1993). Theory of Reflectance and Emittance spectroscopy. *Cambridge University Press*, New York, 455p.
- Helbert J., Berthelot B. et Soler C., 2004. HYEMALIS : Un simulateur d'images de paysages tridimensionnels complexes. *Rev. Franç. Photo. Télé détec.* 173/174, 27-35.
- Idso B. et De Wit C. T., 1970. Light relations in plant canopies. *Appl. Opt.*, 9:177-184.
- Jacquemoud S. et Baret F., 1990. PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra. *Remote Sens. Environment*, 34: 75-91.
- Kimes D.S. et Kirchner J.A., 1982. Radiative transfer model for heterogeneous 3-D scenes, *Applied Optics*, 21:4119-4129.
- Li X. et Strahler, A.H., 1992. Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of the discrete crown vegetation canopy: effect of crown shape and mutual shadowing. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 30: 276-291.
- Li X., Strahler A.H. et Woodcock, C.E., 1995. A hybrid geometric optical-radiative transfer approach for modeling albedo and directional reflectance of discontinuous canopies. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 33: 466-480.
- Myneni R. B., Asrar G., Kanemasu E.T., 1989. The theory of photon transport in leaf canopies. *Theory and applications of optical remote sensing*, A. G Eds., Wiley, New-York: 167-265.
- North P.R.J., 1996. Three-dimensional forest light interaction model using a Monte Carlo method. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 34(5): 946-956.
- Pinty, B., N. Gobron, J.-L. Widlowski, S. A. W. Gerstl, M. M. Verstraete, M. Antunes, C. Bacour, F. Gascon, J.-P. Gastellu, N. Goel, S. Jacquemoud, P. North, W. Qin, and R. Thompson (2001) 'Radiation Transfer Model Intercomparison (RAMI) Exercise', *Journal of Geophysical Research*, 106, 11,937-11,956.
- Pinty, B., J.-L. Widlowski, M. Taberner, N. Gobron, M. M. Verstraete, M. Disney, F. Gascon, J.-P. Gastellu, L. Jiang, A. Kuusk, P. Lewis, X. Li, W. Ni-Meister, T. Nilson, P. North, W. Qin, L. Su, S. Tang, R. Thompson, W. Verhoef, H. Wang, J. Wang, G. Yan, and H. Zang (2004) 'Radiation transfer Model Intercomparison (RAMI) exercise: Results from the second phase', *Journal of Geophysical Research*, 109, D06210 10.1029/2003JD004252.
- Ross, J., 1981. The Radiation Regime and Architecture of Plants Stands. Boston: W. Junk.
- Thompson R.L. et N.S. Goel, 1998. 2 models for rapidly calculating bidirectional reflectance: Photon spread (ps) model and statistical photon spread (sps) model. *Remote Sensing Rev.*, 16: 157-207.
- Verhoef W., 1998. Theory of radiative transfer models applied in optical remote sensing of vegetation canopies. *Thesis*, Agricultural University, Wageningen, Pays Bas, 310p.
- Widlowski, J.-L., M. Taberner, B. Pinty, V. Bruniquel-Pinel, M. Disney, R. Fernandes, J.-P. Gastellu-Etchegorry, N. Gobron, A. Kuusk, T. Lavergne, S. Leblanc, P. Lewis, E. Martin, M. Mottus, P. J. R. North, W. Qin, M. Robustelli, N. Rochdi, R. Ruiloba, C. Soler, R. Thompson, W. Verhoef, M. M. Verstraete, et D. Xie, 2007. 'The third Radiation transfer Model Intercomparison (RAMI) exercise: Documenting progress in canopy reflectance modelling', *Journal of Geophysical Research*, vol 112, doi 10.1029/2006JD007821, 2007.

