

Etude des couverts forestiers par inversion de formes d'onde Lidar à l'aide du modèle de transfert radiatif DART développé par le Cesium

■ Audrey UEBERSCHLAG

Les problématiques environnementales et de gestion des ressources non renouvelables préoccupent de plus en plus notre société. Pour apporter des solutions, il est devenu primordial d'étudier le fonctionnement des surfaces continentales et leurs interactions avec le climat et l'Homme. Le modèle DART (Discrete Anisotropic Radiative Transfer), développé au CESBIO, contribue à cet objectif via la simulation de mesures de télédétection et du bilan radiatif de milieux naturels et urbains.

Depuis peu, il comprend un module "Lidar", bien adapté à l'étude des couverts végétaux. Ce Projet de Fin d'Etudes a consisté à valider ce module et à proposer des améliorations en termes de fonctionnalité et de robustesse, principalement à travers l'inversion de mesures Lidar pour la détermination de paramètres structuraux des couverts forestiers : hauteur du couvert végétal et profil vertical de densité volumique foliaire. Ce travail a été réalisé en collaboration avec la NASA pour la préparation de la mission DESDynI.

MOTS-CLÉS

DART, Lidar, modélisation, inversion, hauteur du couvert, LAI

Ce projet s'est déroulé au sein du CESBIO (Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère) qui est un laboratoire de recherche basé à Toulouse en France. Le CESBIO développe plusieurs modèles de suivi et d'évolution de phénomènes environnementaux et participe à la préparation de missions spatiales telles que la mission SMOS (*Soil Moisture and Ocean Salinity*) afin d'étudier le fonctionnement des surfaces continentales et leurs interactions avec l'Homme et le climat. Un des modèles développés dans ce laboratoire est le modèle DART (*Discrete Anisotropic Radiative Transfer*, CESBIO@ [2010]). Il s'agit d'un modèle de transfert radiatif optique dans le système "Terre-Atmosphère-Capteur". En développement depuis 1993, il permet de reconstituer des paysages et d'étudier les différents mécanismes énergétiques et biophysiques qui affectent ces surfaces. Le laboratoire ayant constaté de fortes demandes pour les Lidar spatiaux dédiés à l'étude de la végétation et ayant la possibilité de collaborer avec la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) pour la préparation de la mission spatiale DESDynI (DESDynI@ [2010]),

un module "Lidar", qui comme son nom l'indique modélise la technologie du Lidar à retours d'onde complets, a été récemment introduit dans DART.

Les Lidars à retours d'onde complets

Le Lidar (*Light Detection And Ranging*) est un capteur actif utilisé en télédétection. Il utilise le principe du Laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) en produisant une source d'énergie intense et cohérente (spatialement et temporellement). Après envoi de cette énergie sous forme d'impulsions (en général gaussiennes), l'appareil enregistre l'énergie renvoyée par l'objet qu'il a lui-même éclairé artificiellement. Ainsi, la mesure Lidar donne deux informations : le temps de trajet de l'onde fournit la distance séparant l'objet de l'appareil de mesure et l'intensité de la réponse donne des indications sur la nature des objets rencontrés. A l'heure actuelle, il existe principalement deux types de Lidar : les Lidar à retours discrets et les Lidar à retours d'onde complets. Dans ce projet, les données utilisées provien-

nent du Lidar à retours d'onde complets LVIS (*Lidar Vegetation Imaging Sensor*, Blair et al [1999]) développé par la NASA. Comme tout Lidar de ce type, il échantillonne toute l'énergie retour sur des intervalles de temps prédéterminés, appelés "bins". Le signal mesuré correspond donc à un profil de l'énergie renvoyée le long du trajet de l'onde. Son mode d'acquisition utilise un système de balayage qui donne des empreintes au sol sous forme de lignes parallèles.

DART et son module Lidar

DART simule le transfert radiatif dans le système "Terre - Atmosphère - Capteur", sur tout le domaine optique, le visible et l'infrarouge thermique inclus, simultanément à plusieurs longueurs d'onde. Il opère sur des paysages 3D naturels (forêt, zone agricole, lac...) et urbains (immeuble, route...) quelconques, avec ou sans relief et atmosphère (*Figure 1*). Ces paysages sont discrétisés en tant que matrices de cellules appelées voxels. La juxtaposition de voxels remplis de matière turbide simule les éléments végétaux (couronne d'arbres, parcelle

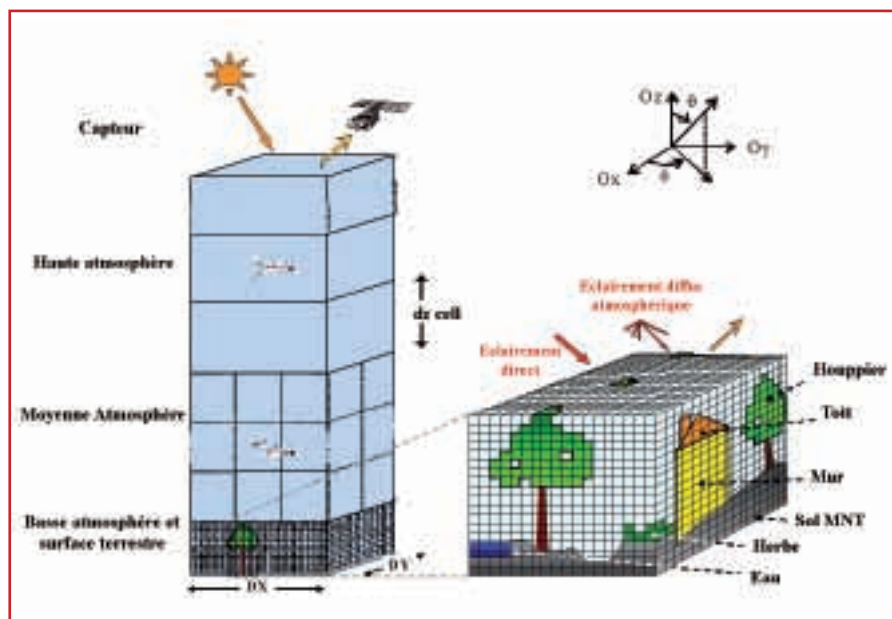


Figure 1. Principes du modèle DART : discrétisation du système "Terre - Atmosphère" et transfert radiatif (Gastellu-Etchegorry [2010]).

agricole...), alors que la juxtaposition d'éléments plans (i.e. triangles ou parallélogrammes) simule les autres éléments du paysage (par exemple des maisons, des troncs d'arbre...). La réunion de cellules "turbides" dans un prisme droit est appelée "plot" et permet de simuler des parcelles agricoles. Bien que schématique, cette modélisation des paysages naturels et urbains est très bien adaptée pour l'étude des images de télédétection spatiale ainsi que pour celle du bilan radiatif de paysages 3D.

Des bases de données spécifient les propriétés optiques et géométriques de l'atmosphère et des milieux terrestres (i.e. végétation, bâti...). Toute cellule peut être remplie par un milieu turbide, qui génère des interactions volumiques 3D, et/ou peut contenir des surfaces planes, qui génèrent des interactions surfaciques 2D. La description de la matière "turbide" (i.e. la végétation) est statistique. Elle est caractérisée par une distribution angulaire (sr^{-1}) et par une densité de surface volumique ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$) de petits éléments plans (i.e. les feuilles) de propriétés optiques lambertiennes et/ou spéculaires qui définissent la fonction de phase turbide. La matière turbide remplit de façon homogène une cellule (dite "cellule turbide"). Cette dernière est alors caractérisée

par la fonction de phase et la densité surfacique foliaire de chaque "espèce" foliaire qu'elle contient. Cependant, lorsqu'on considère la globalité de la maquette, on ne parle plus de densité volumique foliaire η_f mais de LAI (Leaf Area Index). Il s'agit du ratio de la surface totale de la végétation divisée par la surface du sol. Pour un plot :

$$LAI = \frac{w_{f,plot} \cdot V_{plot}}{S_{sol,plot}} \quad (1)$$

Les surfaces planes (i.e. triangles et parallélogrammes) sont, quant à elles, caractérisées par leur orientation, leur aire et leurs propriétés optiques, avec différents types de réflectance (i.e. lambertienne, Hapke et spéculaire) et de transmittance (i.e. directe et diffusion lambertienne).

DART simule le transfert radiatif tridimensionnel en discrétisant l'espace des directions soit avec la méthode de suivi de flux sur l'ensemble du domaine optique (visible, infrarouge thermique...), soit à l'aide de la méthode de Monte-Carlo (suivi de photons) sur le domaine visible. Les paramètres instrumentaux et expérimentaux (dates d'observation...) sont saisis dans une interface graphique qui permet d'afficher d'une part la scène simulée (en représentation 3D ou 2D) et d'autre part les résultats des simulations (images, bilan radiatif...).

Ces procédés de suivi de flux ont été complétés fin 2009 par un nouveau module permettant de modéliser le signal d'un Lidar. Ce module repose sur le suivi de photons avec la méthode de Monte-Carlo appliquée à une scène 3D DART. Dans la suite de l'énoncé vont être présentés le processus de modélisation du signal Lidar et la méthode de Monte-Carlo.

La modélisation DART du Lidar, décrite par la figure 2, comprend les étapes suivantes :

- Lancement séquentiel d'un nombre fini de photons depuis le capteur sur une partie de la scène 3D dans la direction verticale. La surface éclairée par le signal, appelée empreinte au sol, est une ellipse dont la distribution énergétique surfacique est gaussienne. (Figure 2a).
- Suivi de chaque photon lancé à l'aide de la méthode de Monte-Carlo jusqu'à ce qu'il sorte de la scène (ou de la maquette) ou qu'il soit absorbé. Tout photon, qui sort de la maquette selon la direction verticale et qui est issu de la zone dite "ellipse de réception du Lidar", est stocké. Ce stockage est direct. Il est réalisé par bin, c'est-à-dire par intervalle Δr de distance parcourue. Les bins possibles sont prédéfinis à partir de la hauteur du capteur et de la dimension verticale de la maquette et correspondent à un intervalle de temps. L'ensemble des bins constitue la forme d'onde "physique" : nombre de photons reçus par le capteur en fonction du temps. (Figure 2b).
- Convolution de cette première forme d'onde "physique" avec la gaussienne caractérisant la largeur temporelle du pulse laser afin d'obtenir la forme d'onde "instrumentale" réellement mesurée par un Lidar. (Figure 2c).

La seconde étape de la modélisation du signal Lidar consiste à suivre le trajet du photon au sein de la matrice tridimensionnelle et à déterminer s'il est absorbé, diffusé ou transmis pour chaque objet rencontré. Cela est réalisé à l'aide d'une méthode de Monte-Carlo, qui simule les diffusions multiples en une succession de diffusions d'ordre 1, sachant que les

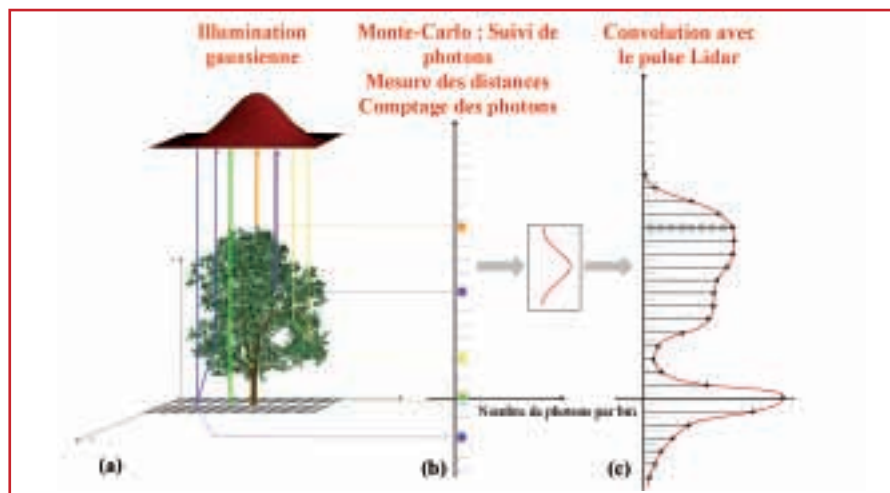


Figure 2. Description de la modélisation du signal Lidar et de la mesure des formes d'onde.



probabilités qu'un photon soit réfléchi, absorbé ou transmis à l'ordre 1 sont connues. Une fois émis par le capteur, chaque photon peut interagir avec tous les éléments terrestres présents dans la maquette et peut alors être absorbé, transmis ou diffusé dans n'importe quelle direction. Ces événements peuvent être décrits par des probabilités d'apparition $P(x)$, comprises entre 0 et 1, qui dépendent des propriétés optiques de l'élément terrestre intercepté. L'approche utilisée diffère selon que le milieu soit une surface plane ou qu'il soit turbide.

La méthode de Monte-Carlo consiste alors à tirer un nombre aléatoire compris entre 0 et 1 à chaque interaction et à le comparer avec la probabilité $P(x)$. Cette méthode étant statistique, il faut donc lancer un très grand nombre de photons pour simuler correctement les interactions physiques macroscopiques.

La validation du module Lidar

La relative jeunesse du module Lidar et sa création à partir d'une méthode de Monte-Carlo préexistante dans le modèle ont impliqué la nécessité d'une phase préalable de tests. Ce processus de validation a été possible en adaptant des quantités du transfert radiatif telles que la luminance. Cela a conduit à la définition d'équations permettant de calculer le nombre théorique de photons qu'un élément doit renvoyer verticalement vers le

capteur. Pour des paysages très simples (uniquement du sol, puis du sol et de la végétation), ces valeurs théoriques ont été comparées à celles proposées par le modèle DART. Deux équations ont ainsi pu être définies. Pour le sol (2) :

$$Nb\ photons(\Omega_v, \Delta\Omega_v) = Nb\ photons(\Omega_s) \times \frac{\rho + \Delta\Omega}{\Pi}$$

Pour un volume de végétation :

$$Nb\ photons(\Omega_v, \Delta\Omega_v) = T(j, \Omega_s, \Omega_v) \times Nb\ photons(\Omega_s) \times \left[G(\Omega_s) \frac{\rho + \Delta\Omega}{\Pi} + (1 - G(\Omega_s)) \frac{\rho + \Delta\Omega}{\Pi} \right] \quad (3)$$

Où :

- $Nb\ photons(\Omega_v, \Delta\Omega_v)$ est le nombre de photons renvoyés à la verticale vers le capteur
- $Nb\ photons(\Omega_s)$ est le nombre de photons envoyés à la verticale vers le paysage
- ρ est la réflectance du sol
- $\Delta\Omega$ est l'angle solide au sein duquel les photons sont renvoyés
- $T(j, \Omega_v, \Delta\Omega_v)$ est la fonction de phase du couvert
- $G(\Omega_s)$ est la distribution angulaire foliaire
- Li est le LAI correspondant à la $j^{\text{ème}}$ couche de végétation

Des erreurs dans la programmation informatique ont été mises en évidence grâce à ces comparaisons puis corrigées. Ainsi les nombres mesurés de photons renvoyés verticalement vers le capteur correspondent aux nombres théoriques de photons. Il subsiste cependant une certaine marge d'erreur due au caractère aléatoire de la méthode de Monte-Carlo (tirage aléatoire d'un nombre entre 0 et 1) qui se

traduit par une dispersion des résultats. Cette phase de tests a aussi permis de contrôler la cohérence des différents paramètres de modélisation du Lidar. Il est alors apparu qu'un nombre minimal de photons (supérieur à 1 million) doit être lancé pour obtenir des résultats cohérents avec la théorie et qu'il est nécessaire de choisir les paramètres d'ouverture du capteur (rayon d'émission et de réception) en adéquation avec la taille des cellules. Pour finir, la manipulation quotidienne de ce module a montré les faiblesses de l'interface graphique initiale. Celle-ci a donc été améliorée et les paramètres du Lidar sont maintenant regroupés en quatre catégories (durée de l'impulsion, géométrie du Lidar, distribution gaussienne et paramètres d'acquisition Lidar).

L'ajout de nouvelles fonctionnalités

Les formes d'onde du Lidar sont sources de diverses informations. Pour compléter et élargir le champ d'application du module Lidar dans le modèle DART, deux fonctionnalités axées sur l'étude de la végétation ont été conçues et implémentées après la validation de celui-ci. La première concerne la détermination de la distribution planimétrique sous forme d'images des altitudes du sol et du haut du couvert. La seconde concerne la détermination du profil vertical de la végétation.

■ La création d'images d'altitude

L'objectif était de créer des images qui donnent la distribution planimétrique des altitudes du sol ou du haut de la canopée. Ces données sont obtenues par détection des pics extrêmes (premier et dernier) des formes d'onde. Pour ce faire, il est préalablement nécessaire de traiter les formes d'onde. Les étapes à suivre sont la déconvolution du signal, lorsque la réponse impulsionnelle du Lidar est connue, la suppression du bruit du signal puis la détection des pics du signal. Deux approches ont été testées pour réaliser cette détection : la première consistait à décomposer la forme d'onde en une somme de

fonctions de Gauss représentatives des monts de la forme d'onde et la seconde, plus basique, reposait uniquement sur la détection des pics du signal.

La décomposition de la forme d'onde en une somme de gaussiennes a été testée sur des signaux simulés et réels à l'aide de deux méthodes : l'algorithme d'Espérance et de Maximisation et l'algorithme "Orthogonal Matching Pursuit". Ces procédés n'ont pas permis d'obtenir des détections des pics fiables (nombre de pics détectés faux ou positions imprécises) et automatisables. C'est pourquoi, une seconde approche a été adoptée. La recherche des pics s'effectue par détection du nombre de passages à zéro de la dérivée première de la forme d'onde. Ces positions sont ensuite triées, puis les premiers et derniers pics sont respectivement associés aux positions du haut de la canopée et du sol.

Les images nécessitant la connaissance des altitudes pour une certaine résolution planimétrique (les pixels peuvent par exemple représenter des zones de 10 x 10 m), il est indispensable d'effectuer une interpolation des altitudes des formes d'onde. Ces images peuvent ensuite être visualisées en 2D ou en 3D (Figure 3) et permettent d'étudier les particularités du paysage. L'apparition de pics du sol dont les altitudes sont proches de ceux du haut de la canopée peut signifier soit l'existence d'un couvert de type sous-bois proche du sol, soit la présence d'une végétation très dense qui a empêché le passage du signal jusqu'au sol.

■ La détermination des profils foliaires verticaux

L'objectif était de déterminer les profils foliaires verticaux à partir de l'inversion des formes d'onde. Les profils foliaires verticaux sont constitués des indices de LAI (*Leaf Area Index*) de chaque couche de la végétation. Cet indice correspond à la surface de végétation divisée par la surface au sol de celle-ci. Il est sans unité et est, en général, compris entre 0 et 6.

Deux méthodes ont été développées pour déterminer ces profils foliaires verticaux puis comparées à la méthode proposée par Lefsky et al. [1999]. La première méthode, conçue dans un but de tests et appelée méthode "Cellule", n'est applicable qu'à des simulations DART. En effet, elle repose sur la discrétisation des paysages en matrices de voxels et permet de calculer, par inversion, un LAI pour chaque voxel. Dans la pratique, une simulation DART est réalisée. Celle-ci permet de reconstituer une forme d'onde pour chaque colonne de voxels (soit $i \times j$ formes d'onde pour une scène définie par i lignes et j colonnes) qui est inversée à partir de l'équation (3). Le profil foliaire de l'empreinte au sol est ensuite obtenu en effectuant la moyenne des profils précédents.

La seconde méthode, dite méthode "Couche", est, quant à elle, applicable aux données réelles ou simulées. Grâce à cette méthode, l'inversion prend en compte une information supplémentaire : le taux de couverture de la végétation. Son application à des données réelles requiert donc l'utilisation de données externes

telles que des images satellites classifiées. Contrairement à la première méthode, une simulation fournit une seule forme d'onde et par suite, l'inversion correspond à un seul profil foliaire vertical.

Ces trois méthodes ont été appliquées à des paysages très simples (parallélépipède de végétation et arbre) puis à des formes d'onde réelles et simulées d'un paysage réaliste : la forêt de Howland, située dans l'Etat du Maine aux Etats-Unis. L'inversion de formes d'onde simulées, à l'aide des méthodes "Couche" et "Cellule", s'est avérée performante pour la détermination des profils foliaires verticaux absolus avec des erreurs absolues maximales de 20 % sur le LAI total (Figure 4). L'inversion avec la méthode de Lefsky donne, quant à elle, des résultats très faibles qui ne sont pas comparables aux profils théoriques. Il s'agit alors de profils relatifs. Cependant, la normalisation de ces trois profils permet de retrouver des résultats similaires. Ces profils normalisés peuvent être directement utilisés pour des études comparatives et doivent être complétés par des mesures indépendantes du LAI pour être exploités en tant que profils foliaires verticaux absolus.

Suite à ces tests, la méthode "Couche" a pu être considérée comme opérationnelle pour la détermination des profils foliaires absolus à partir de données simulées. Son application à des données réelles a cependant été impossible. Cela est dû à la méconnaissance de la transformation entre la puissance envoyée par le Lidar et l'intensité du retour des formes d'onde définie en compte numérique. Les tests pourront être repris en 2011 grâce à de nouvelles données.

Une méthode, la méthode "couche" permet finalement de réaliser l'inversion des formes d'onde. Les résultats obtenus soulignent l'intérêt de coupler les mesures Lidar à des mesures satellites, c'est-à-dire à des capteurs de télédétection, capables de donner le taux de couverture de la végétation ainsi que l'intérêt de prendre en compte la distribution spatiale de la végétation.

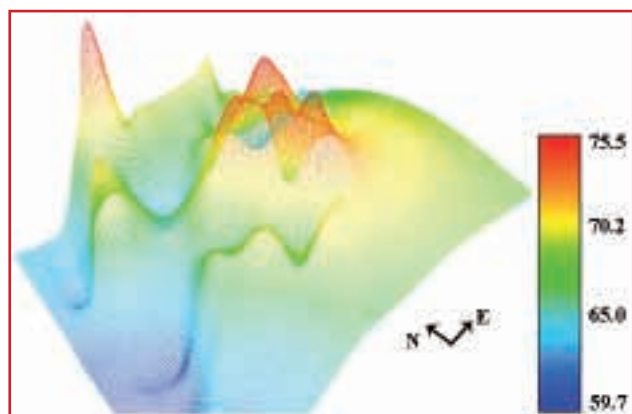


Figure 3. Visualisation 3D de l'image d'altitude du haut de la canopée de la forêt de Howland (données réelles) dans le système géodésique WGS84, projection UTM zone 19. La résolution de l'image est de 1x1m. La précision des altitudes, exprimées en mètres, est de +/- 15 cm.

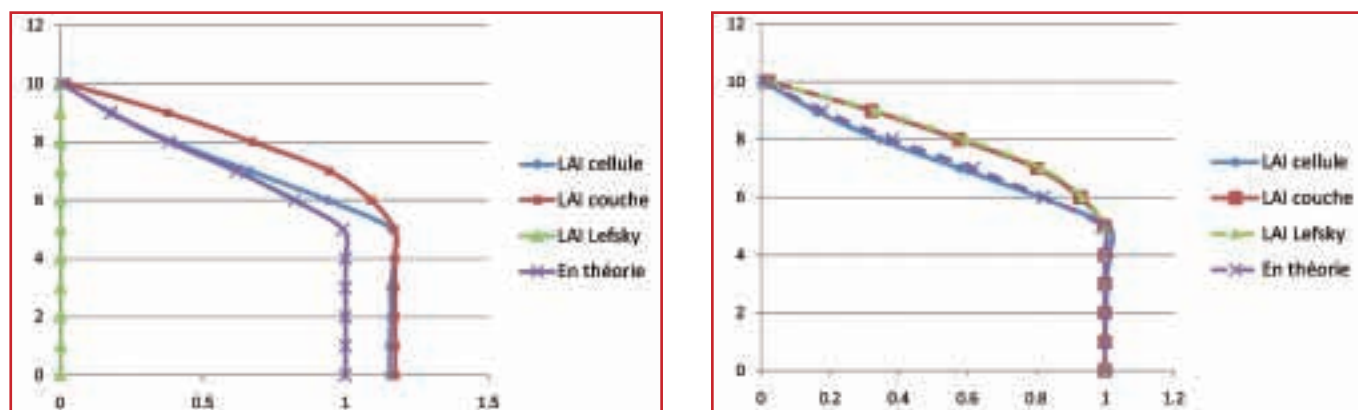


Figure 4. Profils foliaires absolus (gauche) et normalisés (droite) d'une scène composée d'un arbre. L'axe des abscisses correspond au LAI et celui des ordonnées au n° de la couche (la couche 0 correspond au sol).

Conclusion

Les travaux réalisés durant ce projet montrent que le module Lidar de DART peut être considéré comme stable et opérationnel. L'interface graphique modifiée permet aux utilisateurs d'accéder plus facilement à ce module.

Les deux nouvelles fonctionnalités développées ont été intégrées dans DART. La première, qui correspond à la création d'images d'altitude, donne les résultats espérés et permet d'étudier les variations d'un paysage. La seconde fonctionnalité recherchée, qui est la détermination des profils foliaires absolus, a été développée à partir d'une modélisation analytique du signal Lidar en fonction du profil vertical de LAI. Deux méthodes ont été développées et implémentées : la méthode "Cellule" dédiée à des tests de précision et surtout la méthode "Couche" dédiée à l'inversion de signaux Lidar simulés et mesurés. Ces deux méthodes ont été comparées à la méthode analytique proposée par Lefsky. La méthode "Couche" s'est avérée être la plus performante avec des erreurs absolues maximales de 20 % sur le LAI total. De plus, la précision de l'inversion s'est révélée être dépendante du taux de couverture et de sa distribution verticale. La méthode d'inversion développée prend en compte ces derniers. D'un point de vue opérationnel, cela requiert une information supplémentaire qui peut être dérivée d'images satellites. Cela souligne l'intérêt de combiner les mesures Lidar à d'autres sources d'informations.

À la fin de ces travaux, plusieurs perspectives d'amélioration et d'évolution peuvent être envisagées. Les recherches dans le domaine du Lidar seront donc poursuivies, en particulier dans le cadre de la collaboration entre le CESBIO et la NASA pour la préparation de la future mission DESDynI. On peut entre autres citer un projet d'inter-comparaison des principaux modèles Lidar existants. Puis concernant le développement de DART, le module Lidar sera amélioré à travers l'insertion des visées inclinées ou la modélisation de l'atmosphère. ●

Bibliographie

- Blair, J.B., Rabine, D.L., Hofton, M.A., [1999] *The Laser Vegetation Imaging Sensor : a medium-altitude digitisation-only, airborne laser altimeter for mapping vegetation and topography* ; ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Elsevier Science B. V., Vol. 54, pp. 115-122
- Gastellu-Etchegorry, J-P., CESBIO, [2010] *Modélisation physique 3D d'images de télédétection spatiale*, Université Paul Sabatier, Toulouse
- Lefsky, M.A., Cohen, W.B., Acker, S.A., Parker, G.G., Spies, T.A., Harding, D., [1999] *Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-Fir Western Hemlock Forests* ; Remote Sensing of Environment, Elsevier Science Inc., Vol. 70, pp. 339-361
- CESBIO@ [2010] *Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère*
URL: <http://www.cesbio.ups-tlse.fr/>
- DESDynI@ [2010] *DESDynI* -
Home URL: <http://desdyni.jpl.nasa.gov>

Contact

Audrey UEBERSCHLAG
Ingénieur topographe
a.ueberschlag@gmail.com

ABSTRACT

Issues about our environment and the management of natural resources are of growing concern. To find optimal solutions, it became essential to study the functioning of Continental Surfaces and their interactions with climate and our society. The DART model (Discrete Anisotropic Radiative Transfer) developed by CESBIO contributes to these objectives with simulations of remote sensing images and radiative budget of natural or urban landscapes. Recently, a new Lidar module dedicated to vegetation studies was added to DART.

The aims of this project are the validation of the Lidar module and its improvement in terms of functionality and robustness. The major improvement is the introduction of inversion methods which determine vegetation parameters (canopy height and leaf density profile) from simulated and measured Lidar waveform. This work was conducted in cooperation with NASA, in the frame of the preparation of the future DESDynI satellite mission.