

ETUDE DES COUVERTS FORESTIERS PAR INVERSION DE FORMES D'ONDE LIDAR A L'AIDE DU MODELE DE TRANSFERT RADIATIF DART DEVELOPPE PAR LE CESBIO

Société d'accueil : Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère (CESBIO)
18, avenue Edouard Belin
BP1 2801
31401 TOULOUSE Cedex 9

PFE présenté par : **Audrey UEBERSCHLAG**

Directeur du PFE : Jean-Philippe GASTELLU-ETCHEGORRY

Correcteurs : Tania LANDES
Françoise



NERRY

Introduction

Ce projet s'est déroulé au sein du Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère, un laboratoire rattaché à quatre tutelles : l'Université Paul Sabatier de Toulouse (UPS), le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) et l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD).

A l'heure actuelle, les problématiques environnementales et de gestion des ressources non renouvelables sont au centre des débats. Pour répondre à ces questionnements et proposer des solutions, il est devenu primordial d'étudier le fonctionnement des surfaces continentales ainsi que leurs interactions avec le climat et l'Homme. Le CESBIO effectue cela à travers l'étude d'images satellites, la préparation de missions spatiales et la création de modèles de processus et de suivi d'évolution. Le modèle DART (Discrete Anisotropic Radiative Transfer), modèle de transfert radiatif optique dans le système « Terre-Atmosphère-Capteur », fait partie des modèles proposés par le laboratoire. En développement depuis 1993, il permet de reconstituer des paysages et d'étudier les différents mécanismes énergétiques et bio-physiologiques qui affectent ces surfaces. Pour ce faire, trois modes d'analyse existent. Le dernier développé est le module « Lidar », qui simule, comme son nom l'indique, la technologie du Lidar.

Mon projet entre dans le cadre de l'intégration de ce nouveau module. Il s'agit de vérifier et de valider le fonctionnement du modèle, puis d'ajouter deux nouvelles fonctionnalités à ce dernier afin d'étudier plus particulièrement la structure de la végétation.

1. Le modèle DART

Le modèle DART simule le transfert radiatif dans le système « Terre-Atmosphère-Capteur », sur tout le domaine optique, visible et infrarouge thermique inclus, simultanément à plusieurs longueurs d'onde. Il opère sur des paysages 3D naturels (forêt, zone agricole, lac,...) et urbains (bâtiment, route, ...) quelconques, avec ou sans relief et atmosphère. Ces paysages sont discrétisés en tant que matrices tridimensionnelles de cellules appelées voxels.

La végétation, thème principal de ce projet, est modélisée à l'aide d'une juxtaposition de voxels remplis de matière turbide. Cette matière turbide est caractérisée par une distribution angulaire (sr^{-1}) et une densité de surface volumique ($\text{m}^2.\text{m}^{-3}$) de petits éléments plans (i.e. les feuilles) de propriétés optiques lambertiennes et/ou spéculaires.

La modélisation du Lidar dans DART repose, quant à elle, sur le suivi de photons à l'aide de la méthode de Monte-Carlo appliquée aux scènes 3D décrites précédemment. En pratique, il s'agit de lancer tour à tour, à la verticale, un nombre fini de photons, de suivre leur trajet, d'enregistrer leur temps de parcours, puis de créer la forme d'onde du Lidar. Le suivi de photons s'effectue à l'aide de la méthode Monte-Carlo, qui permet de déterminer, par tirage d'un nombre aléatoire entre 0 et 1, si le photon est absorbé, diffusé ou transmis au niveau de chaque élément du paysage.

2. L'étalonnage du modèle

Le module Lidar a été introduit dans le modèle DART en fin d'année 2009 en adaptant la méthode de Monte-Carlo préexistante dans le modèle. Ce développement récent implique la nécessité d'une phase de tests et de débogages.

L'adaptation de quantités du transfert radiatif telle que la luminance 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. 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 marge d'erreur due au caractère aléatoire de la méthode de Monte-Carlo (tirage aléatoire d'un nombre entre 0 et 1).

Cette phase de test 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. De plus, les centres d'émission, depuis lesquels les photons diffusés sont renvoyés, et les centres des cellules sont éloignés les uns des autres. Cela peut entraîner une sous-estimation du nombre de photons mesurés par rapport à la théorie. Il est alors 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 modifiée : les paramètres du Lidar sont maintenant regroupés en quatre catégories et les valeurs par défaut des paramètres ont été redéfinies permettant ainsi une utilisation plus fonctionnelle du module.

3. La création du paysage « test »

Suite à la validation du module Lidar, le modèle DART peut être utilisé pour reconstituer un vol Lidar. Les données disponibles proviennent d'un vol réalisé en 2003 à l'aide du Lidar LVIS (Laser Vegetation Imaging Sensor) développé par la NASA (National Aeronautics and Space Administration) au-dessus de la forêt de Howland, située dans l'Etat du Maine aux Etats-Unis. Depuis quelques années, cette forêt sert de base d'étude à de nombreux projets. Cela signifie qu'un grand nombre d'informations telles que la position des arbres ou leurs dimensions approximatives sont connues. Il a alors été possible de recréer ce paysage dans DART et de modéliser les différentes empreintes au sol du Lidar.

Des formes d'onde réelles et simulées ont ensuite été comparées afin d'estimer la pertinence des paramètres choisis. L'échantillon des 89 formes d'onde LVIS présente un coefficient de corrélation R^2 moyen de 0,52, mais ces coefficients varient de 0,09 à 0,97. Cela indique que la correspondance entre les formes d'onde réelles et simulées n'est pas généralisable et que certaines sont similaires alors que d'autres ne le sont pas du tout. Ces différences peuvent être dues à plusieurs facteurs provenant de la modélisation. Tout d'abord, les choix des paramètres du paysage sont nécessairement approximatifs. Ainsi aucun modèle numérique de terrain n'a été introduit dans la modélisation. De plus, la modélisation de la végétation introduit automatiquement une simplification et une homogénéité irréaliste des éléments. D'autre part, l'assimilation des visées inclinées à des visées verticales peut être une source d'incertitudes. Finalement, la position des mesures LVIS par rapport aux positions mesurées des arbres est aussi une source d'imprécisions. Bien qu'imparfaite, cette maquette de la forêt a tout de même permis de tester les deux fonctionnalités développées au cours du projet sur des données simulées, puis sur les données réelles associées. Ces fonctionnalités sont présentées dans la suite de l'énoncé.

4. L'ajout de deux 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 ont été conçues et implantées. Elles sont principalement axées sur l'étude de la végétation et de sa structure. 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.

4.1. 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 permettent d'obtenir une approximation satisfaisante des formes d'onde, mais la détection des pics n'est pas fiable. En effet, d'une part, le nombre de pics détectés ne correspond pas automatiquement au nombre de pics « vus » et d'autre part, les positions des pics détectés ne sont pas toujours précises (certaines erreurs sont de l'ordre du mètre). L'application de cet algorithme n'est donc pas automatisable sur un grand ensemble de formes d'onde. 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.

Le traitement d'un ensemble de formes d'onde conduit à l'obtention d'un ensemble d'informations géoréférencées. Les images nécessitant la connaissance des altitudes pour une certaine résolution planimétrique (les pixels peuvent par exemple représenter des zones de 1x1m), il est indispensable d'effectuer une interpolation des données déduites des formes d'onde. Les images peuvent ensuite être visualisées en 2D ou en 3D.

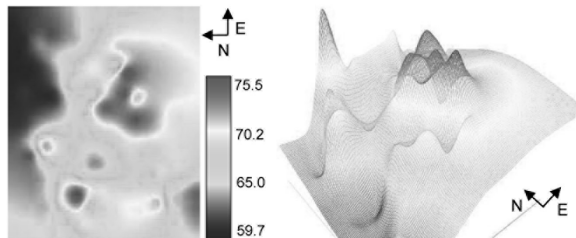


Figure 1 : Visualisation 2D (gauche) et 3D (droite) de l'image d'altitude du haut de la canopée de la forêt de Howland (données réelles) dans le système de coordonnées UTM 19. La résolution de l'image est de 1m x 1m. La précision des altitudes, exprimées en mètres, est de +/- 15 cm.

4.2. 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. Le LAI 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, 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 cellule. La seconde méthode, dite méthode « couche », est, quant à elle, applicable aux données réelles ou simulées. Elle prend en compte une information supplémentaire qu'est 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. Un indice de LAI est calculé pour chaque couche.

Ces trois méthodes ont été appliquées à des paysages très simples (parallépipède de végétation et arbre) puis à des formes d'onde réelles et simulées d'un paysage réaliste : la forêt de Howland. 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. L'inversion avec la méthode de Lefsky ne donne, quant à elle, que des profils relatifs. Cependant, la normalisation de ces trois profils permet de retrouver des résultats similaires. La méthode « couche » est donc opérationnelle pour la détermination des profils foliaires absolus. Les résultats obtenus soulignent alors l'intérêt de coupler les mesures Lidar à des mesures satellites, c'est-à-dire à des capteurs de télédétection, capables de donner la distribution planimétrique du LAI et le taux de couverture de la végétation.

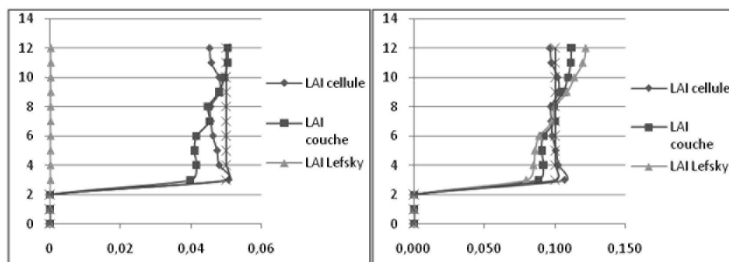


Figure 2 : Profils foliaires absolus (gauche) et normalisés (droite) d'une scène composée d'un plot (parallépipède) couvrant la moitié du sol. L'axe des abscisses correspond au LAI et celui des ordonnées au n° de la couche (la couche 0 correspond au sol).

Conclusion

Les travaux réalisés montrent que le module Lidar de DART peut être considéré comme stable et opérationnel. L'interface graphique de ce dernier a été remaniée pour en faciliter la fonctionnalité.

La méthode de création d'images d'altitude a été développée via la mise au point de plusieurs méthodes de traitement du signal. Elle donne les résultats espérés.

L'autre fonctionnalité recherchée (*i.e.* détermination des profils foliaires absolus) a été développée à partir d'une modélisation analytique du signal Lidar en fonction du profil vertical de LAI et du taux de couverture. 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 de 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 ce dernier. D'un point de vue opérationnel, cela requiert une information supplémentaire. Cette information peut être dérivée d'images satellites, ce qui souligne l'intérêt de combiner les mesures Lidar à d'autres sources d'informations.

Ces deux fonctionnalités sont en cours d'intégration dans le modèle DART par l'équipe informatique. L'évolution du module Lidar va être poursuivie, en particulier dans le cadre de la préparation de la future mission DESDynI (Lidar spatial) de la NASA. Ainsi, son fonctionnement va être généralisé aux cas de visées obliques et de paysages avec atmosphère. Le module sera aussi comparé aux principaux modèles Lidar disponibles, dans un projet de la communauté scientifique internationale.