Rapport final d'exécution - UMR TETIS

Convention CNES n° 150372/00 2015/2016

Projets STEM-LEAF et BIOMASS

TOSCA Surfaces Continentales
2013-2015

11 Décembre 2015

S. Durrieu , E. Grau, C. Lavalley, M. Bouvier

Contenu

STEM-LEAF 3

1. Rappel des objectifs du projet 3

2. Travaux réalisés par TETIS 4
   - 2.1. Simulation du signal lidar en forêt par modeles de transfert radiatif 4
     - 2.1.1. Développement d'une plateforme de simulation 4
     - 2.1.2. Validation des simulations par transfert radiatif et intérêt des différentes maquettes 8
     - 2.1.3. Analyses pour le dimensionnement d'un capteur Lidar spatial 12
   - 2.2. Développement d'un simulateur de signal large empreinte par agrégation de données ALS 14
     - 2.2.1. Méthodes d'agrégation des données ALS 15
     - 2.2.2. Validation et analyse de sensibilité 15
     - 2.2.3. Premiers résultats 16

BIOMASS 19

Comparaison Lidar-radar bande P pour les mesures de biomasse 19

1. Rappel des objectifs du projet 19

2. Rappel des résultats obtenus en 2014 19

3. Travaux réalisés en 2015 20
   - 3.1. Analyse de sensibilité 20
   - 3.2. Amélioration du modèle d'estimation de la biomasse 22

PRODUCTION SCIENTIFIQUE 2015 23

STEM-LEAF
COMPTE RENDU DES TRAVAUX REALISES EN 2015

Fiche Synthétique de présentation du projet

TITRE : **STEM-LEAF**

STudies based on **E**xperimental and **M**odelled waveforms for the **LEAF** (Lidar for Earth and Forests) mission

DISCIPLINE : ETUDE ET OBSERVATION DE LA TERRE / SURFACES ET BIOSPHERE CONTINENTALES

TYPES D'ACTIVITES AUXQUELS SE RATTACHE LE PROJET
Modélisation ou simulation sol
Exploitation de données
Contribution à la spécification de capteurs adaptés à la caractérisation du sol et du sursol. Développement éventuel de prototypes Lidar.

PARTENAIRES : UMR TETIS, CESBIO, UMR AMAP, LCSE-CEA, INRA-Climat, Sol, Environnement

RESPONSABLE SCIENTIFIQUE :
Sylvie DURRIEU,
UMR TETIS Irstea-CIRAD-ENGREF
Maison de la Télédétection en Languedoc-Roussillon
500, rue J.F. Breton, BP 5095 34196 Montpellier
Téléphone : 04 67 54 87 32
Télécopie : 04 67 54 87 00
e-mail : sylvie.durrieu@teledetection.fr

1. RAPPEL DES OBJECTIFS DU PROJET

Le projet STEM-LEAF s'inscrit dans le cadre des études amont menées par le CNES pour le développement d'une mission lidar spatiale végétation. Il vise à progresser sur l'un des deux points à consolider en priorité : l'optimisation des systèmes d'émission et de réception pour obtenir des signaux exploitables sur tous les types de forêts.
Dans ce contexte, l'objectif du projet STEM-LEAF est de définir des expérimentations et de développer des outils qui permettront d'analyser l'impact de certaines caractéristiques d'un système lidar spatial (longueur d'onde, taille d'empreinte, énergie incidente, échantillonnage spatial, …) sur la dynamique du signal retour et sur la qualité des paramètres forestiers dérivés des formes d'onde lidar. Le projet s'appuie sur l'analyse de signaux lidar modélisés et sur l'analyse de données expérimentales.

Pour atteindre l'objectif visé un effort important a été déployé pour développer des méthodes et outils permettant de modéliser de façon fiable des signaux lidar pour différentes configurations système et sur différents types de végétation, en particulier sur les milieux qui seront les plus contraignants, à savoir les forêts tropicales denses et les forêts en zone de relief.

Les deux premières années du projet les travaux ont principalement portés sur la mise en place de scènes forestières et sur la modélisation du signal lidar par transfert radiatif. Ces travaux sur les scènes se sont poursuivis mais l'accent a été mis sur des analyses de sensibilité du signal sur les scènes déjà produites avec pour objectifs :

1- D'évaluer l'impact du type de représentation des forêts (types de scènes) sur la qualité des simulations, afin d'identifier quel type de représentation est le mieux à même de représenter une forêt réelle.
2- D'initier l'étude de l'impact de certains paramètres systèmes sur la qualité du signal.

En parallèle du développement d'une plate-forme de simulation basée sur les codes de modélisation du transfert radiatif de DART, les travaux pour développer et valider un outil d'estimation du signal large empreinte basé sur l'agrégation de données expérimentales lidar à petite empreintes ont repris (travail initié pendant la thèse de T. Allouis (2009-2011)). Le développement et la consolidation d'outils pour le traitement des données Lidar ont aussi été poursuivis.

2. TRAVAUX REALISES PAR TETIS

Ce rapport d'avancement présente le travail réalisé au sein de l'UMR TETIS. Les personnes ayant contribué à l'étude sont E. Grau (postdoc CNES + CDD Irstea), C. Lavalley (projet de mastère Silat), M. Bouvier (CDD Irstea) et S. Durrieu (permanent Irstea). Les études sont menées en lien avec le Cesbio (J.-P. Gastellu-Echegorry et N. Lauret), qui continue à faire évoluer le simulateur de transfert radiatif DART et en étroite collaboration avec l'UMR AMAP (G. Vincent et C. Antin) sur la partie représentation des scènes et modélisation et traitement du signal lidar. Les analyses se sont focalisées sur les forêts de pin (maquettes Amap disponibles en 2015, cf. Rapport intermédiaire d'exécution transmis par AMAP) et sur des scènes dérivées uniquement de données lidar terrestre (TLS) en forêt tropicale.
Le rapport final de postdoctorat d'Eloi Grau et le rapport de mastère Silat de Claudia Lavalley présentent une description détaillée du travail réalisé. Les grandes lignes sont présentées dans ce rapport. Le travail sur la calibration du système Lidar Riegl utilisé lors d'une campagne en Guyane a été poursuivi. Ce travail a fait aussi l'objet d'une partie spécifique dans le rapport de postdoctorat d'Eloi Grau et ne sera pas décrit ici.

2.1. SIMULATION DU SIGNAL LIDAR EN FORET PAR MODELES DE TRANSFERT RADIATIF

2.1.1. DEVELOPPEMENT D'UNE PLATEFORME DE SIMULATION

Cette plateforme, développée en Python par Eloi Grau dans le cadre de son postdoctorat, est composée de plusieurs modules qui permettent :

- De générer, pour un site d'étude donné, des scènes forestières de trois types selon les données terrain disponibles : maquette AMAP (générées grâce à la plateforme AMAPSim) issues d'une représentation architecturale fine des arbres calibrée sur des relevés de terrain (figure 1a), maquettes DART, basées sur une représentation simplifiée en forme de « sucette » (ellipse pour la couronne) des arbres basée sur des mesures de diamètre du tronc et hauteurs (totale et couronne) sur le terrain (figure 1b) et enfin maquettes TLS issues des méthodes de voxellisation mises au point et validée lors de la première année de postdoctorat d'Eloi Grau (figure 1c).



(a) (b) (c)

Figure 1 : *Les trois types de maquettes forestières utilisés en entrée du modèle de transfert radiatif*

- De lancer la simulation du transfert radiatif sur les maquettes disponibles en spécifiant les paramètres du système lidar dont on souhaite simuler le signal, en appelant DART et en stockant les sorties des simulations
- De générer des formes d'onde de référence pour valider les simulations par agrégation de données ALS à forme d'onde complète disponibles sur les sites
- De calculer un certain nombre de métriques pour décrire de façon synthétique les formes d'onde afin de les comparer (figure 2). Certaines des métriques sont issues de la littérature et leur potentiel pour prédire des paramètres forestiers tels que la hauteur de la végétation ou la biomasse aérienne a déjà été démontré. De nouvelles métriques, dont le potentiel reste à confirmer, mais qui permettent à minima une comparaison des formes d'onde, ont été proposées.
- De procéder à une analyse de sensibilité en modifiant des paramètres des scènes forestières (e.g. LAI, profils de LAI, réflectances de la végétation et du sol…) et des paramètres du système d'acquisition (longueur d'onde, taille d'empreinte, angle de visée…) pour étudier l'impact de ces paramètres sur le signal.

Les métriques proposées sont les suivantes (cf. rapport de Postdoctorat d'Eloi Grau) :

- 2 métriques liées à la hauteur du peuplement :
  - altM [m] : hauteur maximum de la WF au-dessus du bruit
  - ext [m] : extension de la WF au-dessus du bruit. Le seuil pour définir le bruit peut dépendre du bruit atmosphérique et solaire. Il est par défaut fixé à 0.01 % du maximum du signal.
- 4 métriques liées à la puissance du signal reçu :
  - – N (normalisation) : nombre total de photons reçus (i.e. facteur de normalisation exprimé en nombre de photons).
  - – pSol (pic du sol, [% d'énergie]) : nombre relatif maximum de photons reçus (dans la waveform normalisée) de laWFsol (en pourcentage, i.e. le nombre absolu est obtenu par : pSol ?N/100).
  - – pVeg (pic de la vegetation) [% d'énergie] : nombre relatif maximum de photons reçus (dans la waveform normalisée) de laWFveg (en pourcentage d'énergie, i.e. le nombre absolu est obtenu par : pVeg ?N/100)
  - – iVeg [% d'énergie] : proportion d'énergie (par rapport à l'énergie totale) provenant de la végétation.
- 4 métriques liées à la distribution verticale du LAI :
  - rh15, rh50, rh85 (Relative Height, [% de la hauteur max]) : correspondent aux dZ de la WFveg calculés aux percentiles (resp. 15%, 50%, 85%), exprimés en pourcentage de la hauteur totale (rh0). rh15 est donc la profondeur de pénétration correspondant aux 15

premiers pourcents de l'énergie de la waveform ; rh50 est la profondeur entre 15% et 50% de l'énergie la waveform ; et rh85 est la profondeur qui sépare les hauteurs pour lesquelles on a atteint 50% et 85% de l'énergie la waveform. Ces métriques sont liées à la distribution verticale relative des feuilles, elles permettent la comparaison de forme d'ondes obtenues sur des peuplements de hauteurs différentes mais de structure verticale similaire (e.g. un peuplement jeune et vieux d'un certain type d'arbre auront potentiellement les mêmes profils verticaux, mais des hauteurs absolues différentes)

- altP [m] : hauteur du pic maximum de laWFveg

Certains modules de la plateforme ont été utilisés par l'UMR AMAP pour mener à bien l'étude sur la simplification des maquettes détaillées (Cf. rapport AMAP).
En interne la plateforme a été utilisée pour valider la modélisation par transfert radiatif et comparer la qualité des différents types de maquette au regard d'un objectif de simulation d'un signal Lidar et étudier l'impact de certains paramètres du système sur la qualité du signal.

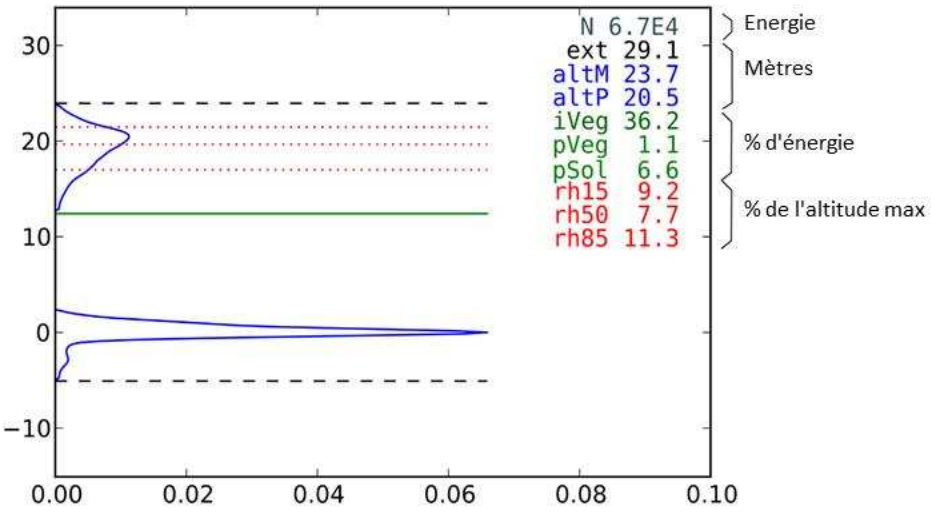


Figure 2 : *Métriques calculées pour comparer les sorties des simulations et pour être ensuite utilisées dans les modèles de prédiction de paramètres forestiers. Elles peuvent être regroupées en 3 famille*

Table des matières

STEM-LEAF 3

1. Rappel des objectifs du projet 3

2. Travaux réalisés par TETIS 4

2.1. Simulation du signal lidar en forêt par modeles de transfert radiatif 4

2.1.1. Développement d'une plateforme de simulation 4

Figure 1 : Les trois types de maquettes forestières utilisés en entrée du modèle de transfert radiatif 5

Figure 2 : Métriques calculées pour comparer les sorties des simulations et pour être ensuite utilisées dans les modèles de prédiction de paramètres forestiers. Elles peuvent être regroupées en 3 famille 6

s ; les métriques caractérisant la hauteur des peuplements (ext, altM), le profil de végétation (rh15, rh50, rh85, altP) et l'énergie retour reçue par le Lidar (N, iVeg, pVeg, pSol). Un coefficient de corrélation (CC) permet de comparer globalement les formes d'onde. 8

2.1.2. Validation des simulations par transfert radiatif et intérêt des différentes maquettes 8

Figure 3 : Exemple de formes d'onde ALS simulées et comparées aux formes d'ondes acquises par Lidar ALS aéroporté. Les formes d'onde sont agrégées au niveau de la placette pour pouvoir effectuer la comparaison. Il s'agit ici d'une placette de pins adultes. 9
Figure 4 : Etude de l'impact d'un changement de la réflectance de la végétation dans les maquettes sur les formes d'onde simulées. L'impact est mesuré en comparant les métriques des formes d'onde simulées aux métriques de la forme d'onde obtenue pour avec les paramètres initiaux. L'écart moyen de toutes les placettes est exprimé en pourcentage des métriques issues des mesures ALS en ordonnée. L'abscisse représente l'évolution du paramètre, ici la réflectance de la végétation, par rapport au paramètre dans les maquettes de base (calibration initiale. Sa variation est donnée par le facteur multiplicatif F(ρveg). L'évolution du paramètre N (nombre total de photons reçus) est représentée à part (courbe du bas). 10
Figure 5 : Sensibilité globale des métriques Lidar au changement des valeurs des paramètres étudiés pour les maquettes de type TLS (réflectance du sol et de la végétation (ρground, ρveg) et la distribution (TLSLAI distribution), et de certains paramètres pour les maquettes de type DART (pente (slope), LAI total (LAI), LAI de la végétation basse (LAIgrass) et distribution du LAI (DARTprofile).....11
Figure 6 : exemple de maquettes sucettes DART (à drotie) et TLS (à gauche) obtenues sur liste de Marelongue à La Réunion. 12
Figure 7 : Exemple de formes d'onde obtenues sur les deux placettes de Marelongue avec deux types de maquettes (scènes TLS voxellisées et type sucette DART (appelé « terrain » sur cette figure)). 12
2.1.3. Analyses pour le dimensionnement d'un capteur Lidar spatial 12
Figure 8 : Sensibilité globale des métriques Lidar à un changement d'angle d'incidence et de taille d'empreinte du système Lidar sur le site des Landes (haut) et celui de la réunion (bas)pour les maquettes de type TLS.....13
Figure 9 : Energie rétrodiffusée par le sol et la végétation rapportée à l'unité d'énergie émise pour un capteur lidar spatial d'1m² à 500 km d'altitude, visant à la verticale un sol de réflectance 0.5 et couvert d'une végétation de réflectance 0.57 dont on fait varier le LAI et le taux de couvert. Le calcul est fait sans prendre en compte l'atmosphère.....14
2.2. Développement d'un simulateur de signal large empreinte par agrégation de données ALS.....14
2.2.1. Méthodes d'agrégation des données ALS.....15
2.2.2. Validation et analyse de sensibilité.....15
Figure 10 : Exemple de 3 acquisitions avec une même densité de mesures mais avec des tailles d'empreintes différentes, i.e. des rayons valant respectivement 1/4 , 1/2 et 1 fois la distance entre centre des empreintes.....16
2.2.3. Premiers résultats.....16
Figure 11 : Interface de l'outil permettant l'agrégation des données lidar ALS 16
Figure 12 : Comparaison du signal issu de l'agrégation des formes d'ondes complètes à petite empreinte (en bleu) au signal lidar large empreinte total (en vert à gauche) et au signal large empreinte avec les diffusions d'ordre 1 (en vert à droite).....17
Figure 13: Comparaison des FWF obtenues par agrégation PE ME et la FWF LE de référence, pour le "milieu moyen", avec des empreintes de rayon de 7 cm et une distance entre leurs centres de 30 cm. La forme d'onde en bleu représente la forme d'onde large empreinte de référence. Les formes d'onde en rouge représentent respectivement, de gauche à droite : les formes d'onde complètes petite empreinte agrégées, les échos agrégés lorsque l'on connaît la position et l'intensité (ME-intensité), la position et le rang (ME-rang) et juste la position (ME-Z). la

dernière figure représente l'agrégation sans pondération des échos (ME-None). 17
BIOMASS 19
Comparaison Lidar-radar bande P pour les mesures de biomasse 19
1. Rappel des objectifs du projet 19
2. Rappel des résultats obtenus en 2014 19
3. Travaux réalisés en 2015 20
3.1. Analyse de sensibilité 20
Figure 14: Augmentation relative de l'erreur des modèles de biomasse lorsque le rayon des placettes de calibration décroit de 50 à 10 m. 21
Figure 15 : Augmentation relative de l'erreur des modèles de biomasse lorsque le nombre de placettes de calibration décroit de 100 à 10. Les échantillons de placettes utilisés sont sélectionnés aléatoirement parmi toutes les placettes et cette sélection est répétée 100 fois. Les lignes noires horizontales représentent la valeur médiane, les boites représentent les 25eme et 75eme percentiles, les moustaches représentent les 5eme et 95eme percentiles, et les points noirs représentent les valeurs extrêmes. 21
Figure 16: Augmentation relative de l'erreur des modèles de biomasse lorsque l'erreur commise sur la mesure du centre des placettes est augmentée. Les erreurs sont générées par un écart-type croissant de 0 à 10 m 22
3.2. Amélioration du modèle d'estimation de la biomasse 22
PRODUCTION SCIENTIFIQUE 2015 23

s ; les métriques caractérisant la hauteur des peuplements (ext, altM), le profil de végétation (rh15, rh50, rh85, altP) et l'énergie retour reçue par le Lidar (N, iVeg, pVeg, pSol). Un coefficient de corrélation (CC) permet de comparer globalement les formes d'onde.

2.1.2. VALIDATION DES SIMULATIONS PAR TRANSFERT RADIATIF ET INTERET DES DIFFERENTES MAQUETTES

Ce travail a été mené en s'appuyant d'une part sur la comparaison des formes d'onde simulées avec des formes d'onde de références acquises par un système Lidar ALS et agrégées et d'autre part sur l'étude de l'impact des paramètres des scènes forestières sur le signal Lidar large empreinte simulé.

- **Site des Landes :**

Les landes sont le seul site pour lequel on disposait en 2015 des données pour générer les 3 types de maquettes. Les types de maquettes ont été validés et comparés sur ce site.

Les maquettes de base ont été construites pour 7 placettes présentant des hauteurs et densités différentes.
Sur ces placettes, toutes les informations utiles à une calibration fine n'étaient pas disponibles (par exemple réflectance de la végétation et du sol, LAI des peuplements pour les maquettes type « sucettes DART»). Des valeurs standards ont été utilisées issues de bases de données existantes ou de la littérature, parfois ajustées en fonction des informations de terrain (TLS par exemple).

Les données simulées sur ces maquettes de base sont des formes d'onde complète de type ALS. Elles ont été agrégées et confrontées à des formes d'onde obtenues par agrégation de formes d'ondes ALS issues d'acquisitions à petite empreinte sur la même scène (figure 3).

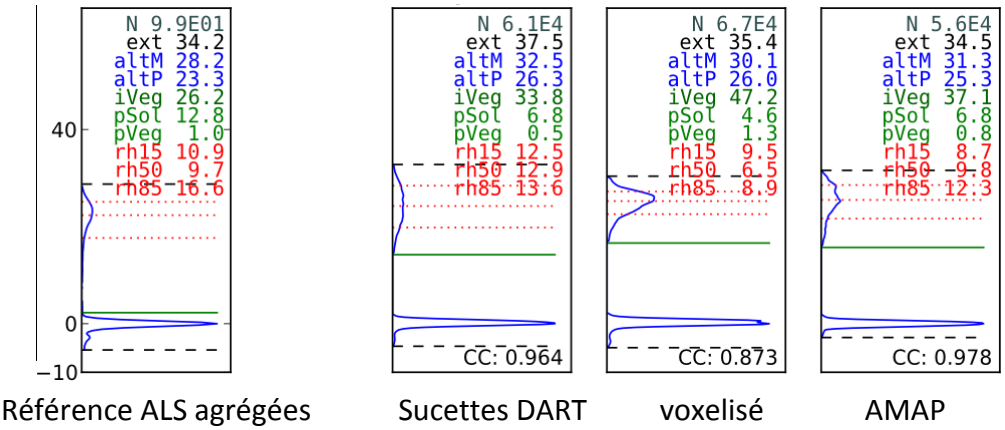


***Figure 3** : Exemple de formes d'onde ALS simulées et comparées aux formes d'ondes acquises par Lidar ALS aéroporté. Les formes d'onde sont agrégées au niveau de la placette pour pouvoir effectuer la comparaison. Il s'agit ici d'une placette de pins adultes.*

Cette première comparaison montre une similitude de forme des signaux avec cependant des intensités maximales et relatives sol/végétation qui peuvent varier sensiblement selon le type de maquette utilisé. L'analyse des résultats montre que les maquettes TLS obtenues par voxellisation pourraient surestimer le LAI, que la forme des houppiers dans les maquettes DART est trop approximative (en particulier hauteur des houppiers obtenue à partir de la hauteur de la première branche vivante sur le terrain et le diamètre du houppier par une relation empirique basée sur quelques mesures du ratio hauteur/diamètre des couronnes). Enfin les maquettes "AMAP" semblent sous-estimer le taux de couvert.
En jouant sur les différents paramètres il est possible d'obtenir des formes d'onde très similaires quel que soit le type de représentation utilisé. Mais la réalisation des maquettes demande un effort de calibration avec des mesures terrain plus complexes et couteuses lorsqu'on passe des modèles TLS, au modèles sucette DART puis AMAP.
L'analyse de sensibilité montre qu'en faisant varier plusieurs paramètres en même temps on peut s'approcher à moins de 10% des valeurs des métriques issues des mesures ALS. Cependant réaliser une calibration fine pour valider les simulations nécessiterait des campagnes de mesures de terrain spécifiques avec des mesures additionnelles de réflectance des différents composants (feuilles, tronc, sol) et éventuellement de LAI.

Une analyse de sensibilité aux valeurs des paramètres suivants a été réalisée :

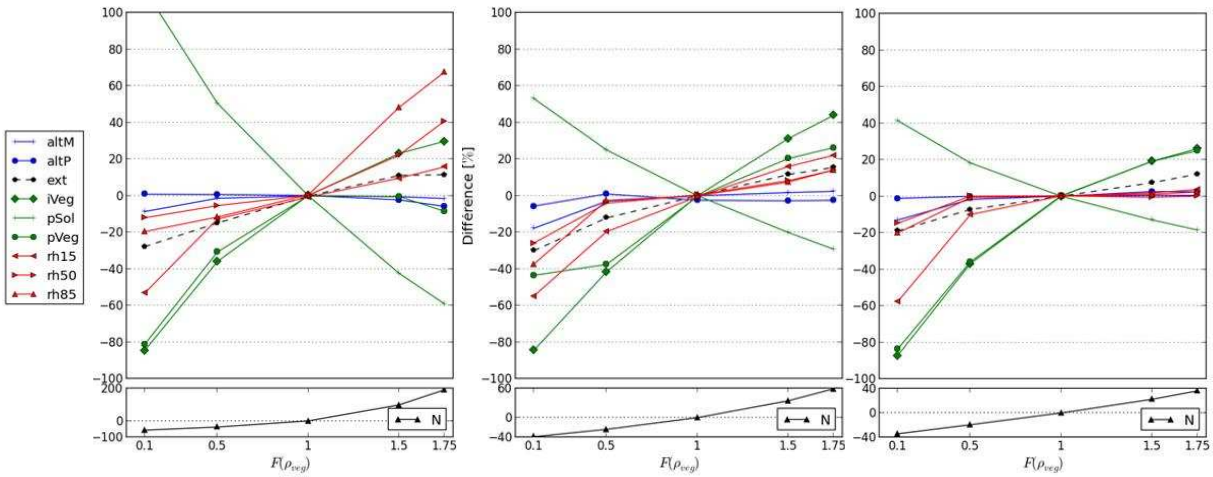
- Réflectance sol et végétation (ρ_{ground}, ρ_{veg}) pour les maquettes AMAP, ainsi que l'impact de la voxellisation de la scène à différentes résolutions, la pente ;
- Réflectance sol et végétation et la distribution du LAI pour les maquettes TLS ;
- Réflectance sol et végétation pour les maquettes sucettes DART ainsi que la pente, le LAI total, la distribution du LAI ($DART_{profile}$) et le LAI de la végétation basse (LAI_{grass}) ai de la couche de végétation a aussi été étudiée pour les maquettes DART.

Un signal large empreinte est simulé ici directement avec les caractéristiques de base du capteur suivantes :

• Longueur d'onde : 1064 nm

• Fréquence d'acquisition : 1 ns
• Pulse gaussien FWHM : 2 ns
• Altitude 500 km
• Énergie du pulse 40 mJ
• Surface du détecteur 0.5 m2 (R ≃ 0.4 m)
• Rayon du footprint 15 m (17 m en réception)
• Nombre de photons DART 100000 5000 / tir
• Angle zénithal 3°

La figure 4 présente un exemple de résultat d'analyse de sensibilité.



Sucettes DART TLS voxellisé AMAP

Figure 4 *: Etude de l'impact d'un changement de la réflectance de la végétation dans les maquettes sur les formes d'onde simulées. L'impact est mesuré en comparant les métriques des formes d'onde simulées aux métriques de la forme d'onde obtenue pour avec les paramètres initiaux. L'écart moyen de toutes les placettes est exprimé en pourcentage des métriques issues des mesures ALS en ordonnée. L'abscisse représente l'évolution du paramètre, ici la réflectance de la végétation, par rapport au paramètre dans les maquettes de base (calibration initiale. Sa variation est donnée par le facteur multiplicatif F(ρveg). L'évolution du paramètre N (nombre total de photons reçus) est représentée à part (courbe du bas).*

La figure 5 présente une synthèse de la sensibilité des métriques Lidar étudiées lorsque les différents paramètres de la scène varient pour un type de représentation. L'amplitude maximale des variations est reportée pour chaque paramètre ainsi que le sens de variation.

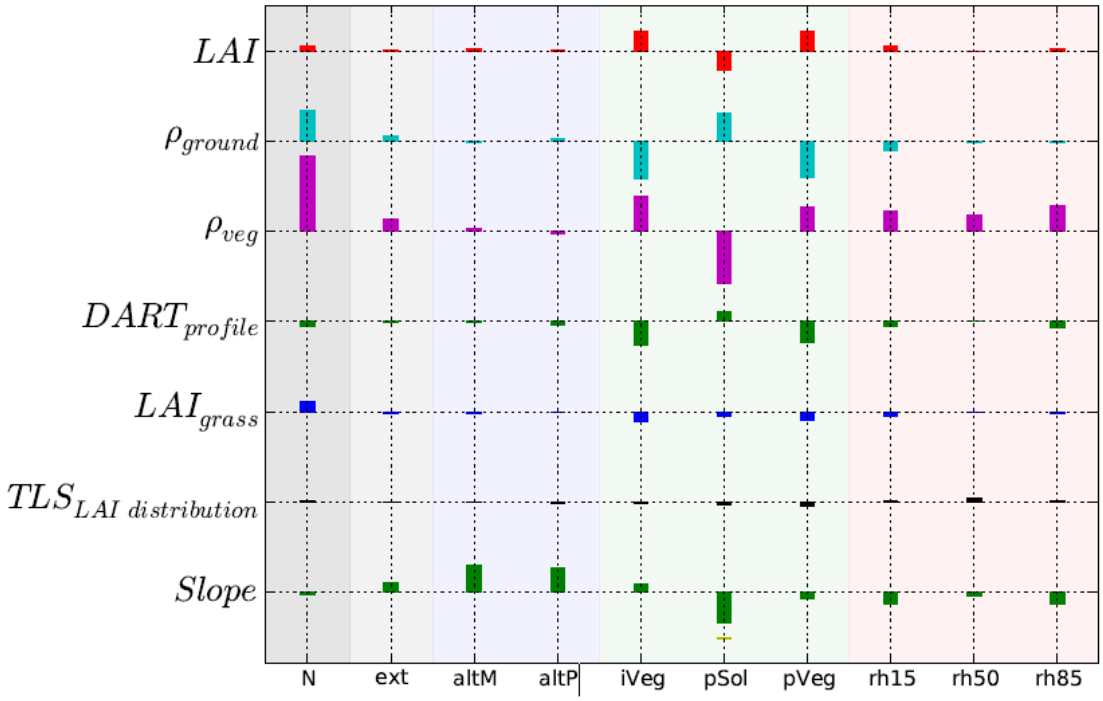


Figure 5 : *Sensibilité globale des métriques Lidar au changement des valeurs des paramètres étudiés pour les maquettes de type TLS (réflectance du sol et de la végétation (ρground, ρveg) et la distribution (TLSLAI distribution), et de certains paramètres pour les maquettes de type DART (pente (slope), LAI total (LAI), LAI de la végétation basse (LAIgrass) et distribution du LAI (DARTprofile).*

Cette étude montre que (cf rapport de fin de postdoctorat d'E. Grau) :

1. Le niveau du signal (métrique N) est d'abord influencé par la réflectance de la végétation et du sol (i.e. la longueur d'onde) ;
2. l'intensité du signal provenant de la végétation (iVeg) dépend du LAI, de la réflectance du sol et de la végétation, des profils de végétation dans les houppiers ;
3. la valeur maximale du pic du sol (pSol) est fortement dépendante de la réflectance de la végétation (corrélation négative), mais aussi de la pente et du LAI ;
4. les métriques de hauteur (altM et altP) dépendent essentiellement de la pente;
5. les percentiles de hauteur sont d'abord sensibles à la réflectance de la végétation (pour un type de peuplement donné). Mais il est très probable que ces percentiles soient plus sensibles au type de peuplement, dans la mesure où chaque type de peuplement a une distribution verticale des feuilles propre.

- **Site de La Réunion :**

Seules des maquettes TLS et sucettes DART ont pu être élaborées sur ce site et ce pour 4 placettes (figure 6).

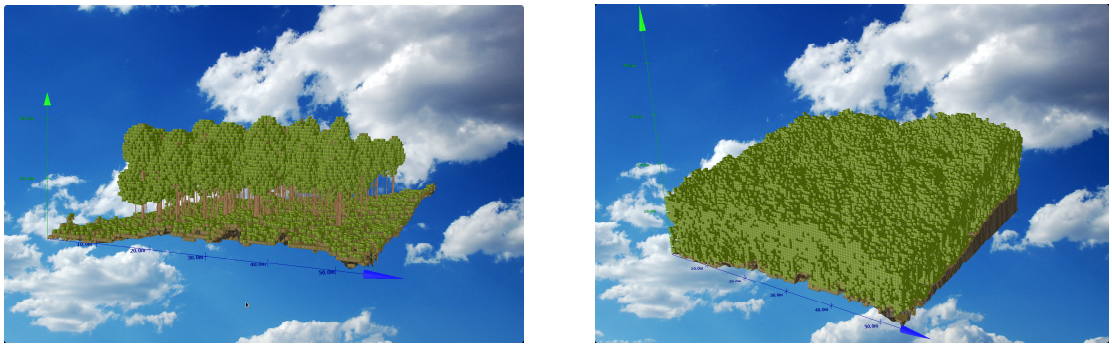
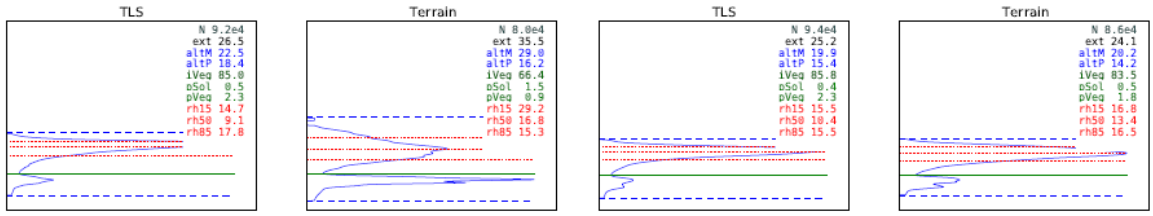


***Figure 6** : exemple de maquettes sucettes DART (à drotie) et TLS (à gauche) obtenues sur liste de Marelongue à La Réunion.*

Les résultats montrent que le niveau de similitude entre les formes d'onde est variable d'une placette à l'autre avec la calibration de base effectuée (figure 7).



(a) Marelongue 150 (b) Marelongue 300

***Figure 7 :** Exemple de formes d'onde obtenues sur les deux placettes de Marelongue avec deux types de maquettes (scènes TLS voxellisées et type sucette DART (appelé « terrain » sur cette figure)).*

Par ailleurs, les données acquises par le prototype lidar du CEA embarqué sur ULM n'ayant pas pu être géo-référencées avec une précision suffisante pour être superposées aux placettes de terrain, seule une analyse de sensibilité du signal à certains paramètres des maquettes a pu être réalisée. Ces analyses ont montré la forte sensibilité du signal à la dimension des houppiers et au profil de LAI dans le houppier lorsque des maquettes DART sont utilisées. Or ces informations sont difficiles à mesurer sur le terrain.
Par ailleurs l'analyse de la sensibilité des métriques lorsque les paramètres des maquettes évoluent donne des tendances similaires à celles observées sur le site des Landes.

Sites de Guyane et du Brésil :

Ces sites on fait l'objet de mesures terrain qui n'ont pas encore été exploitées. Le site du Brésil (eucalyptus) devrait permettre à terme de comparer plusieurs types de maquettes dans un peuplement de type feuillu.

2.1.3. ANALYSES POUR LE DIMENSIONNEMENT D'UN CAPTEUR LIDAR SPATIAL

- Sensibilité du signal aux caractéristiques du capteur

Cette analyse est menée en utilisant les scènes calibrées de base (sans chercher à modifier les paramètres pour optimiser la similitude entre données ALS simulées et mesures ALS).
La sensibilité du signal a été étudiée pour les caractéristiques suivantes du système : angle d'incidence, dimension de l'empreinte et précision du pointage (positon du footprint). La figure 8

récapitule les résultats pour les paramètres angle d'incidence et taille d'empreinte sur les sites des Landes et de La Réunion.

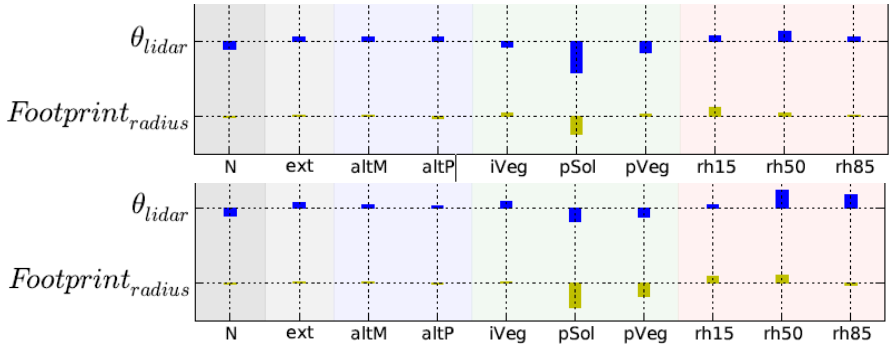


Figure 8 : *Sensibilité globale des métriques Lidar à un changement d'angle d'incidence et de taille d'empreinte du système Lidar sur le site des Landes (haut) et celui de la réunion (bas)pour les maquettes de type TLS.*

.

Les métriques Lidar les plus impactées sont la valeur maximale du pic du sol (pSol), le rh50 et, dans une moindre mesure le pic de la végétation et le rh85. L'impact sur le pic du sol est lié à plusieurs effets qui se conjuguent lorsque la surface de l'empreinte ou l'angle de visée changent. Avec une augmentation de taille d'empreinte, les effets de la topographie, même si la pente est légère, deviennent plus marqués et tendent à étaler le signal du sol, diminuant l'amplitude du pic. Les diffusions multiples augmentent la réponse apparente de la végétation, ce qui contribue à diminuer la part relative du pic du sol.

- **Etude de l'énergie théorique rétro-diffusée par le sol :**

Avoir un ration signal à bruit suffisant au niveau de la réponse du sol est une des contraintes les plus forte pour obtenir un signal exploitable pour les applications forestières. C'est en effet un prérequis pour estimer la hauteur de la végétation et assurer la reconstruction d'un profil de végétation complet.

Une étude théorique a permis d'estimer la proportion d'énergie rétrodiffusée par le sol en fonction du taux de couvert et du LAI. Ce type d'analyse ne prend pas en compte l'étalement du signal mais donne un ordre d'idée de la réponse maximale que l'on peut attendre du sol, exprimée en % de l'énergie émise, selon les caractéristiques de la végétation (figure 9).

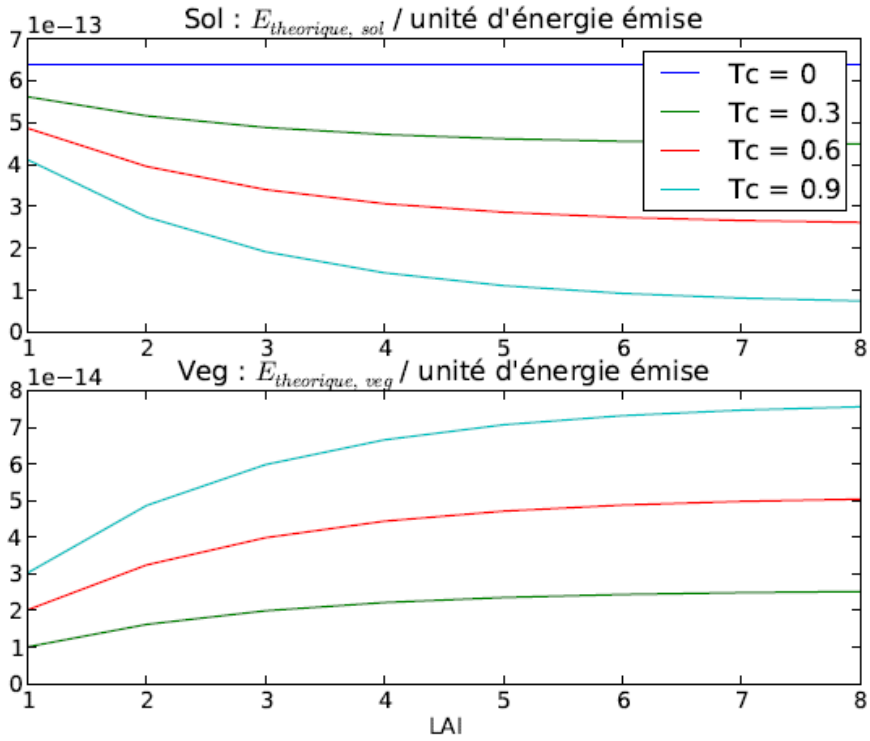


Figure 9 : *Energie rétrodiffusée par le sol et la végétation rapportée à l'unité d'énergie émise pour un capteur lidar spatial d'1m² à 500 km d'altitude, visant à la verticale un sol de réflectance 0.5 et couvert d'une végétation de réflectance 0.57 dont on fait varier le LAI et le taux de couvert. Le calcul est fait sans prendre en compte l'atmosphère.*

- **Impact de l'atmosphère et bruit solaire :**

  Une étude de l'impact de la qualité de l'atmosphère (différents modèles de gaz) sur l'atténuation du signal ainsi que du niveau de bruit solaire selon l'élévation solaire et la qualité de l'atmosphère a montré que l'impact de ces deux facteurs sur le signal reste mineur dans la plupart des situations.

Ces analyses soulignent à la fois le faible niveau d'énergie qui parvient au niveau du capteur en direction du capteur par rapport à l'énergie émise ainsi que le faible impact de l'atmosphère et du bruit solaire sur ce signal retour. Ainsi le bruit instrumental sera probablement la première source de bruit et sera déterminant dans le dimensionnement du capteur.

2.2. Développement d'un simulateur de signal large empreinte par agrégation de données ALS

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet de mastère Silat de Claudia Lavalley. Une plateforme de simulation a été mise en place pour implémenter les modèles d'agrégation proposés dans la thèse de T. Allouis et les valider en s'appuyant sur des simulations. Une partie des outils développés pour la plateforme précédente ont été remobilisés pour cette partie de l'étude. L'intérêt de ces méthodes d'agrégation est de pouvoir simuler des signaux Lidar dans des conditions environnementales très variées, alors que les méthodes précédentes ne peuvent être appliquées que sur un nombre restreint de sites sur lesquels des mesures de terrain sont disponibles.

L'objectif était de développer le simulateur et de valider le principe de l'agrégation en se basant sur des simulations par transfert radiatif. Simuler le transfert radiatif sur des scènes forestières offre en effet la liberté de produire pour une même scène des données lidar à petites empreinte que l'on peut

ensuite agréger et comparer aux formes d'onde large empreinte générées en parallèle sur les mêmes scènes.
Pour valider les méthodes d'agrégation, une analyse de sensibilité des résultats de l'agrégation aux paramètres du milieu et aux paramètres d'acquisition des donnés à agréger a été initiée.

2.2.1. METHODES D'AGREGATION DES DONNEES ALS

Le calcul de la forme d'onde est obtenu par agrégation des données ALS située dans l'empreinte de la forme large empreinte que l'on cherche à simuler que l'on souhaite simuler. Pour les données sous forme d'écho l'agrégation nécessite de pondérer le poids de chaque écho selon l'information disponible associée à l'écho en plus de ses coordonnées 3D (i.e. soit son intensité, soit son rang, soit rien (Cf. rapport de fin de projet Silat de C. Lavalley). Ensuite, qu'il s'agisse de formes d'onde complètes ALS ou d'échos, une pondération est attribuée en fonction de la positon dans la surface de l'empreinte lidar large empreinte correspondante afin de reproduire la distribution spatiale de l'énergie émise par le lidar (gaussienne 2D).

2.2.2. VALIDATION ET ANALYSE DE SENSIBILITE

Pour ce volet de l'étude une plate-forme de paramétrisation et de lancement de simulations de transfert radiatif à l'aide de DART a été mise en place. Puis elle a été utilisée pour mener une analyse de sensibilité. Les facteurs suivants ont été explorés :
1- Type de peuplement : un générateur de scènes forestières, développé précédemment, et permettant de construire des scènes de type sucette -DART avec différents critères de densité d'arbres et de niveaux de stratification a été utilisé. 5 scènes forestières ont ainsi été générées (tableau 1).

Milieu forestier synthétique	**Nb de pieds – Hauteur moyenne – Dimensions houpier**
Foret2	8 pieds – 15m – 10m (strate dominant) 25 pieds – 2m – 1m (sous bois)
Foret dense	30 arbres 30 pieds – 20m – 10m
30arbres_monostrate **(milieu « moyen »)**	30 pieds – 20m – 7m
Foret moyenne 2 strates	15 pieds – 25 – 5 (strate dominant) 15 pieds – 10 – 5 (sous bois)
Foret « concentrée »	30arbres 30 pieds (dont 23 pieds concentres sur 20x20 m) – 20m – 7m

Tableau 1: *Caractéristiques des milieux forestiers synthétiques étudiés*

2- Diffusion multiple : comparaison des signaux agrégés avec le signal large empreinte issu des diffusions d'ordre 1 et du signal total (incluant les diffusions multiples) ;

3- L'échantillonnage spatial : selon les caractéristiques de l'acquisition Lidar (fréquence d'émission, divergence et hauteur de vol, hauteur de vol vitesse de vol, angle de scan…) la densité et le recouvrement des empreintes au sol d'une acquisition ALS peut varier. Le simulateur doit être en mesure de gérer des densités de mesures différentes. Les plans de tirs simulés comprenaient 3 espacements d'empreinte (résolution) différents : 30 cm, 50 cm et 1 m, avec des tailles d'empreinte définies par un rayon de 1/4, 1/2 et 1 fois la résolution conduisant respectivement à un sous-échantillonnage du milieu, un échantillonnage quasi-exhaustif et un sur-échantillonnage du milieu forestier (figure 10). Les tirs ont été simulés au nadir.

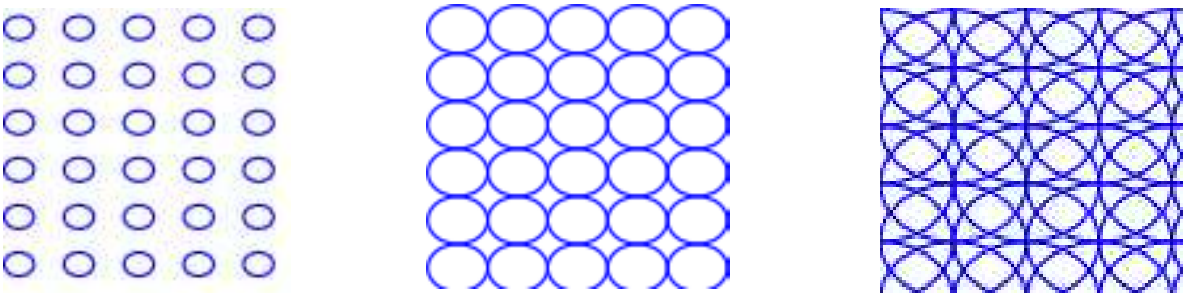


Figure 10 : *Exemple de 3 acquisitions avec une même densité de mesures mais avec des tailles d'empreintes différentes, i.e. des rayons valant respectivement 1/4 , 1/2 et 1 fois la distance entre centre des empreintes.*

Pour l'analyse de sensibilité les formes d'ondes ont été comparées à un cas de référence et les mêmes métriques que dans l'étude précédente ont été utilisées pour la comparaison.

2.2.3. PREMIERS RESULTATS

Une première version de l'outil d'agrégation a été développée (figure 11).

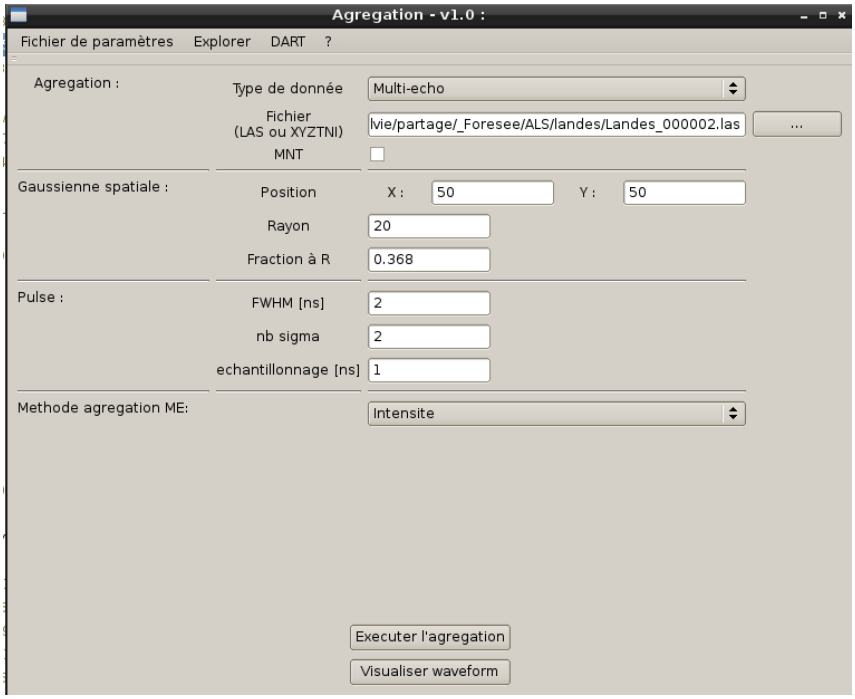


Figure 11 : *Interface de l'outil permettant l'agrégation des données lidar ALS*

Les premières analyses ont montré que l'agrégation de formes d'ondes complètes à petite empreinte représentait fidèlement le signal issu de la rétrodiffusion d'ordre un d'un signal lidar large empreinte (figure 12).

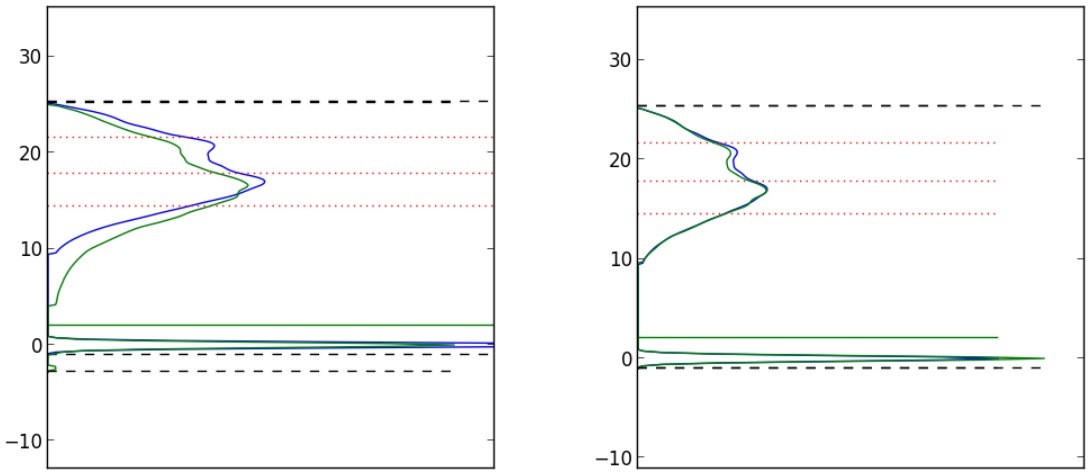


Figure 12 : *Comparaison du signal issu de l'agrégation des formes d'ondes complètes à petite empreinte (en bleu) au signal lidar large empreinte total (en vert à gauche) et au signal large empreinte avec les diffusions d'ordre 1 (en vert à droite).*

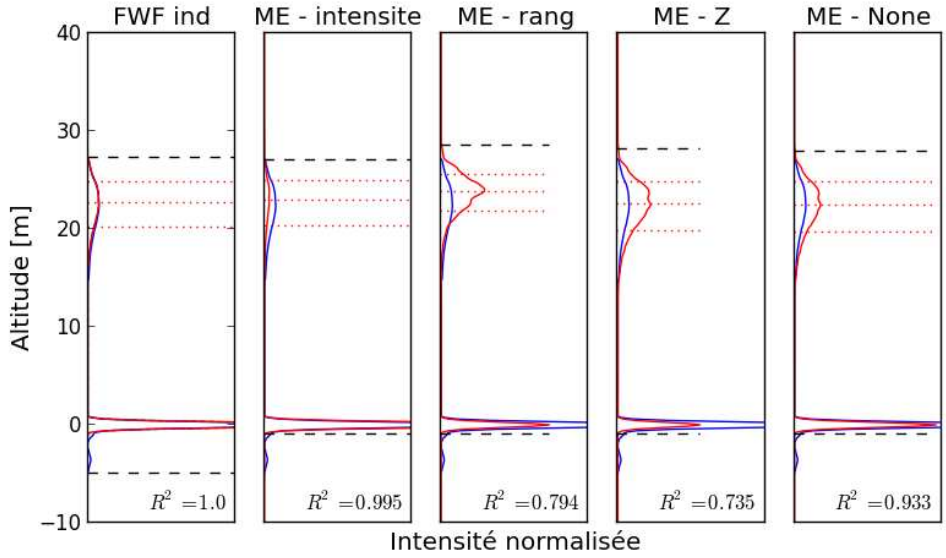


Figure 13: *Comparaison des FWF obtenues par agrégation PE ME et la FWF LE de référence, pour le "milieu moyen", avec des empreintes de rayon de 7 cm et une distance entre leurs centres de 30 cm. La forme d'onde en bleu représente la forme d'onde large empreinte de référence. Les formes d'onde en rouge représentent respectivement, de gauche à droite : les formes d'onde complètes petite empreinte agrégées, les échos agrégés lorsque l'on connaît la position et l'intensité (ME-intensité), la position et le rang (ME-rang) et juste la position (ME-Z). la dernière figure représente l'agrégation sans pondération des échos (ME-None).*

On n'a pas observé d'effet fort du plan d'échantillonnage sur les résultats. En revanche les méthodes d'agrégation donnent des résultats variables et des formes d'onde parfois assez différentes (figure 13). Globalement l'agrégation lorsque l'intensité est connue donne un résultat assez proche de la forme d'onde large empreinte.

Lors d'une première série de test il a aussi été constaté un artéfact lié à la taille des voxels définie pour générer les scènes DART. Une hauteur de voxel trop importante par rapport à la discrétisation

en Z du signal retour entraîne des oscillations sur les formes d'ondes agrégées. Diminuer la résolution verticale des voxels de 1 m à 12,5 cm a fortement atténué cet artéfact.
Pour poursuivre l'évaluation des méthodes d'agrégation, et en proposer de nouvelles le cas échéant, il faudra poursuivre ces analyses en replaçant la normalisation par l'énergie retour qui a été implémentée en amont des comparaisons par une normalisation par l'énergie émise.

BIOMASS

Comparaison Lidar-radar bande P pour les mesures de biomasse

COMPTE RENDU DES TRAVAUX REALISES EN 2015

Fiche Synthétique de présentation du projet

TITRE : **BIOMASS - Comparaison Lidar-radar bande P pour les mesures de biomasse**

DISCIPLINE : ETUDE ET OBSERVATION DE LA TERRE / SURFACES ET BIOSPHERE CONTINENTALES

TYPES D'ACTIVITES AUXQUELS SE RATTACHE LE PROJET
Modélisation ou simulation sol
Exploitation de données
Calibration/Validation.

PARTENAIRES : UMR TETIS, UMR AMAP,

RESPONSABLE SCIENTIFIQUE :
Nicolas BAGHDADI,
UMR TETIS Irstea-CIRAD-ENGREF
Maison de la Télédétection en Languedoc-Roussillon
500, rue J.F. Breton, BP 5095 34196 Montpellier
Téléphone : 04 67 54 87 24
Télécopie : 04 67 54 87 00
e-mail : nicolas.baghdadi@teledetection.fr

1. RAPPEL DES OBJECTIFS DU PROJET

Ce volet du projet BIOMASS vise à apporter des éléments pour comparer les données Lidar-Radar bande P et analyser leur complémentarité pour l'étude de la végétation en forêt tropicale.
Les activités rapportées ici concernent le volet 1 du projet dont l'objectif est de développer le potentiel du lidar aéroporté comme source de données de calibration/validation pour développer les modèles d'estimation de la biomasse à partir des données radar bande P.
Le travail a été mené en étroite collaboration avec l'UMR AMAP

2. RAPPEL DES RESULTATS OBTENUS EN 2014

Le site d'étude est le site expérimental de Paracou, en Guyane. La première partie de l'étude a permis de prendre en main les jeux de données existants, d'appliquer un modèle de biomasse développé pour estimer la biomasse à partir de donnés Lidar dans des sites variés de forêts tempérée, de valider les résultats et de les comparer aux estimations radar (carte de biomasse fournie par le Cesbio sur le site).

Ces premiers résultats ont montré que :

- La qualité des estimations était très sensible à la dimension des placettes utilisées pour calculer la biomasse (la RSD (Relative Standard Error) diminue de 35.6% à 20.5 % lorsque le rayon des placettes passe de 20 à 40 m). Ces résultats peuvent s'expliquer ne partie par les effets de bord importants en forêt tropicale.
- Que le modèle utilisé actuel ne permet pas de décrire de façon satisfaisante la variabilité de la biomasse avec une tendance à la surestimation pour les faibles biomasses et à la sous-estimation pour les fortes biomasses
- Lorsque l'on compare les estimations Lidar et radar aux données de référence terrain sur les placettes au niveau des placettes Guyafor (15 d'une superficie de 6.25 ha et une de 25ha) les évaluations radar donnent des valeurs systématiquement sous-estimées. Les évaluations lidar sont globalement plus élevées. Mais on observe cependant aussi une sous-estimation pour certaines placettes ayant de fortes valeurs de biomasse.

3. TRAVAUX REALISES EN 2015

Sur la base de ces premiers résultats, le premier objectif fixé pour 2015 a été d'améliorer les modèles de prédiction. Le travail en cours porte sur deux points :

- L'amélioration des estimations terrain de biomasse qui servent de référence pour calibrer et valider les modèles de télédétection. Ce travail est réalisé par l'UMR AMAP.
- L'amélioration des modèles d'estimation de la biomasse. Dans un premier temps une analyse de sensibilité a été menée, en utilisant le modèle initial, afin d'identifier les sources d'erreur qui impactent le plus sur la qualité des estimations. Dans un second temps, les métriques retenues dans le modèle initial s'étant révélées insuffisantes pour décrire la structure complexe et sa variabilité spatiale pour les forêts tropicales, un travail d'identification de nouvelles métriques Lidar plus adaptées à cet environnement est en cours.

3.1. ANALYSE DE SENSIBILITE

Il est nécessaire d'analyser plus en profondeur la sensibilité des modèles Lidar sur le site de Paracou. Plusieurs sources d'erreur affectent les estimations des modèles et sont propagées lors de leur développement dans une approche à la placette. En effet, si la précision des modèles est avant tout conditionnée par la complexité de cette forêt tropicale, elle est aussi affectée par les paramètres d'acquisition des données Lidar et terrain. Comprendre et évaluer l'impact de ces différents paramètres sur les modèles développés est une étape indispensable dans ce contexte d'étude.

Le développement de modèles de biomasse sur des placettes de calibration d'un rayon allant de 50 à 10 m, nous a permis de mettre en évidence l'influence de la taille des placettes sur la précision de l'estimation (*Figure 14*). En effet, une placette de taille trop petite ne pourra être représentative de la diversité intra-peuplement. L'utilisation de grandes placettes permet aussi de réduire les effets de bord, lorsqu'un houppier est partiellement inclus dans la placette. L'influence de la taille des placettes apparait critique lorsque le rayon des placettes de calibration est inférieur à 35 m, avec une augmentation importante du RMSE (+ 178 % entre 35 m et 10 m de rayon de placette).

L'influence du nombre de placettes a été étudiée par une approche similaire en utilisant des placettes de 35 m de rayon. Des modèles de biomasse ont été développés avec un jeu de placettes de calibration allant de 100 à 10 placettes (*Figure 15*). Comme attendu, l'erreur commise sur l'estimation de la biomasse augmente lorsque le nombre de placettes de calibration décroit. En effet, Un nombre

trop faible de placettes ne pourra être représentatif de la variabilité inter-peuplements. Cependant l'influence du nombre de placettes est plus faible que celle de la taille des placettes (avec une augmentation maximale de l'erreur médiane de 53 % contre près de 200 % pour le rayon).

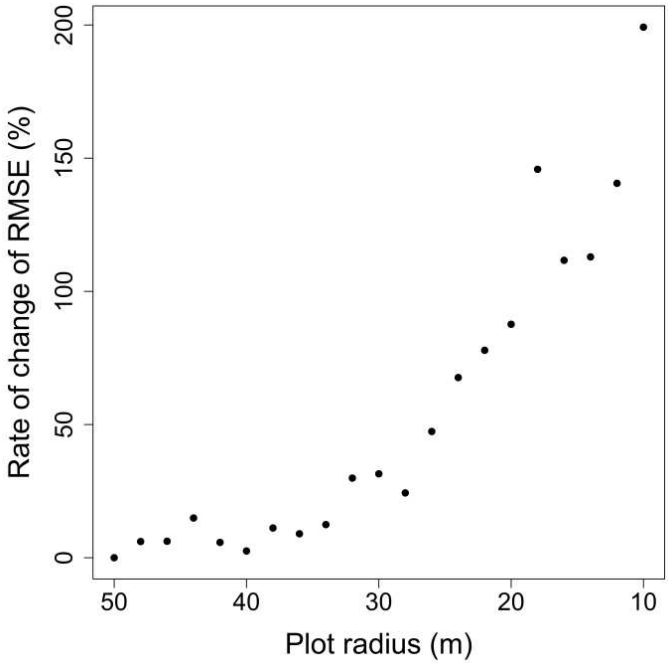


Figure 14: *Augmentation relative de l'erreur des modèles de biomasse lorsque le rayon des placettes de calibration décroit de 50 à 10 m.*

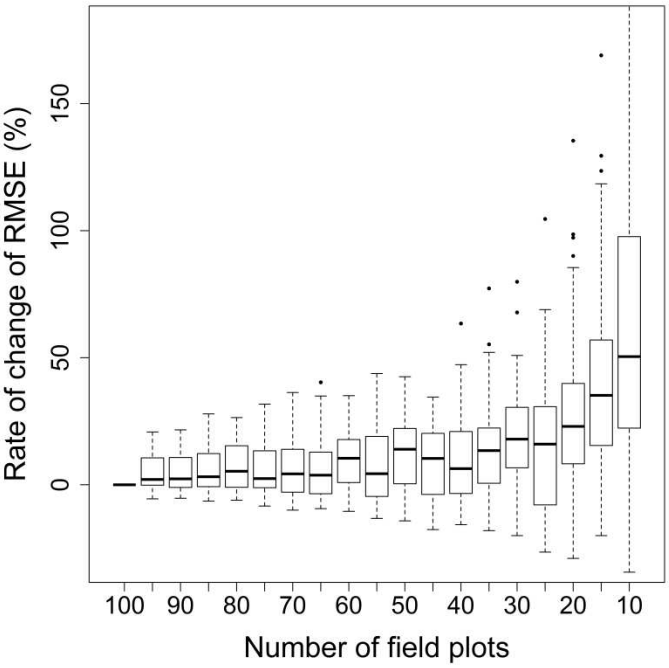


Figure 15 : *Augmentation relative de l'erreur des modèles de biomasse lorsque le nombre de placettes de calibration décroit de 100 à 10. Les échantillons de placettes utilisés sont sélectionnés aléatoirement parmi toutes les placettes et cette sélection est répétée 100 fois. Les lignes noires horizontales représentent la valeur médiane, les boites représentent les 25eme et 75eme percentiles, les moustaches représentent les 5eme et 95eme percentiles, et les points noirs représentent les valeurs extrêmes.*

La précision du positionnement GPS du centre des placettes, nécessaire à la mise en relation des données terrain avec les nuages de points lidar, a aussi été étudiée avec de grandes placettes de 35 m de rayon (*Figure 16*). Cependant, cette précision s'est révélée être une source d'erreur importante qui s'accroît lorsque la taille des placettes diminue.

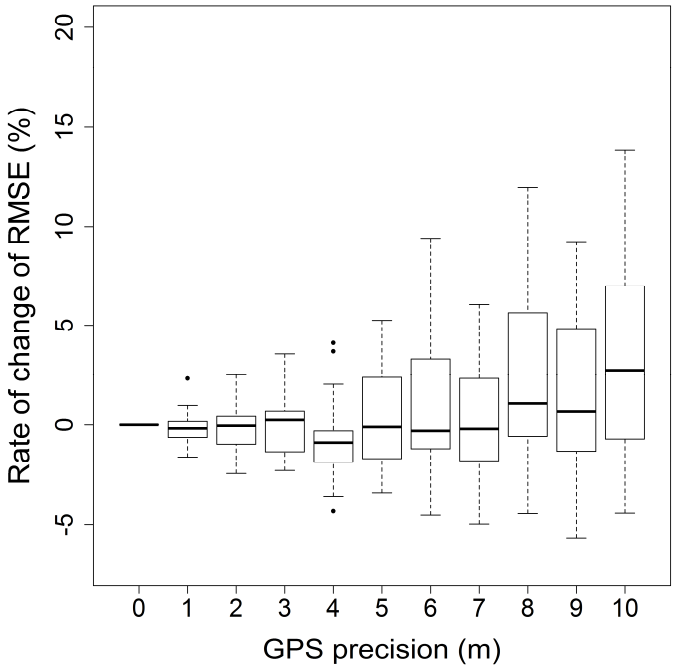


Figure 16: *Augmentation relative de l'erreur des modèles de biomasse lorsque l'erreur commise sur la mesure du centre des placettes est augmentée. Les erreurs sont générées par un écart-type croissant de 0 à 10 m.*

3.2. AMELIORATION DU MODELE D'ESTIMATION DE LA BIOMASSE

Deux nouvelles familles de métriques sont en cours d'exploration. Les métriques proposées dans le cadre du projet STEM-LEAF pour synthétiser les formes d'onde. Et, sont actuellement en cours d'implémentation et d'évaluation de nouvelles métriques mesurant le niveau de pénétration du signal Lidar dans la végétation proposées par Véga et al. (soumis à RSE).

PRODUCTION SCIENTIFIQUE 2015

Conférences :

- C. Antin, E.Grau, G. Vincent, S. Durrieu, M. Jourdan, J-F Barczi, Y. Caraglio, S. Griffon, R. Pélissier, "From leave scale to tree scale: which structural parameters influence a simulated full-waveform large-footprint LiDAR signal" Proceedings of SilviLaser 2015, 28-30 Sept. 2015, La Grande-Motte, France, pp. 110-112.
- Bouvier, M., Durrieu, S., Fournier, R., Saint-Geours, N., Vincent, G., Guyon, D., Grau, E. and Hérault, B. (2015). « Influence of sampling design parameters on biomass predictions derived from airborne lidar data." Proceedings of SilviLaser 2015, 28-30 Sept. 2015, La Grande-Motte, France, pp. 137-140.
- Grégoire Vincent, Cécile Antin, Jean Dauzat, Eloi Grau, Sylvie Durrieu, "Mapping plant area index of tropical forest by Lidar: calibrating ALS with TLS", Proceedings of SilviLaser 2015, 28-30 Sept. 2015, La Grande-Motte, France. Pp. 146-148.
- J. Lochard, J. Costeraste, F.Tinto, E.Grau, S.Durrieu and F. Fabre Low energy LIDARs for biomass applications. , Proceedings of SilviLaser 2015, 28-30 Sept. 2015, La Grande-Motte, France, pp. 143-145.
- E. Grau, S.Durrieu, C.Antin, H.Debise, G.Vincent, C. Lavalley and M.Bouvier, Modelling full waveform Lidar data on forest structures at plot level: a sensitivity analysis of forest and sensor main characteristics on full-waveform simulated data., Proceedings of SilviLaser 2015, 28-30 Sept. 2015, La Grande-Motte, France, pp. 146-148.

Publications :

- Bouvier, M., Durrieu, S., Fournier, R. A., & Renaud, J. P. (2015). Generalizing predictive models of forest inventory attributes using an area-based approach with airborne LiDAR data. Remote Sensing of Environment, 156, 322-334.
- Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry, Nicolas Lauret, Eloi Grau, Jeremy Rubio, Bruce Cook, Douglas Morton, Guoqing Sun, "Simulation of satellite, airborne and terrestrial LiDAR with DART (I): waveform simulation with quasi-Monte Carlo ray tracing" (2015), Remote Sensing of Environment, accepté.
- Eloi Grau, Sylvie Durrieu, Richard Fournier, Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry, Yin Tiangang , "Using voxels to estimate 3D vegetation density with TLS data. A sensitivity analysis of influencing parameters.", Remote Sensing of Environment, en cours de soumission.
- Jean-Luc Widlowski, Mathias Disney, Jennifer Adams, Ioannis Andredakis, Clement Atzberger, James Brennan, Lorenzo Busetto, Michaël Chelle, Guido Ceccherini, Roberto Colombo, Jean-Francois Côté, Alo Eenmäe, Richard Essery, Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry, Eloi Grau, et al., "The fourth phase of the radiative transfer model intercomparison (RAMI) exercise: Actual canopy scenarios and conformity testing" (2015), Remote Sensing of Environment, accepté.
- Cédric Véga, Jean-Pierre Renaud, Sylvie Durrieu, Marc Bouvier, "On the interest of penetration depth, canopy area and volume metrics to improve Lidar-based models of forest parameters", soumis à RSE.

Rapports:

- Grau E., 2015, Simulations de mesures Lidar satellite pour la caractérisation de canopées de forêts tempérées et tropicales. Optimisation des méthodes de simulation et étude de sensibilité du signal., rapport de postdoc,
- Lavalley C., 2015, Développement d'un outil de simulation du signal large empreinte à partir de données LiDAR à petite empreinte, rapport mastère SILAT