

Evaluation d'un prototype LiDAR - Atmosphère/Végétation pour la caractérisation de la végétation forestière : compte rendu final projet 2008-2010

S. Durrieu, T. Allouis, M. Bouvier, P. Chazette, J. Cuesta, Jean Dauzat

▶ **To cite this version:**

S. Durrieu, T. Allouis, M. Bouvier, P. Chazette, J. Cuesta, et al.. Evaluation d'un prototype LiDAR - Atmosphère/Végétation pour la caractérisation de la végétation forestière : compte rendu final projet 2008-2010. [Rapport de recherche] irstea. 2010, pp.26. hal-02596572

HAL Id: hal-02596572
https://hal.inrae.fr/hal-02596572

Submitted on 15 May 2020

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.

PROGRAMME NATIONAL DE TELEDETECTION SPATIALE

FICHE BILAN

TITRE DU PROJET :

Evaluation d'un prototype LiDAR Atmosphère/Végétation pour la caractérisation de la végétation forestière

Rédaction : S. Durrieu, T. Allouis, M. Bouvier, P. Chazette, J. Cuesta, J. Dauzat

SUB/2008/38/INSU - SUB/2009/26/INSU - SUB/2010/18/INSU

Responsable scientifique *: Sylvie DURRIEU*
Laboratoire : UMR Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale
Cemagref-Cirad-ENGREF
adresse, tel, fax, courrier électronique:
UMR TETIS - Maison de la Télédétection en Languedoc-Roussillon
500, rue J.F. Breton BP 5095
34196 Montpellier Cedex 05
Tel standard : 33- (0)4 67 54 87 54
Tel direct : 33- (0)4 67 54 87 32
Fax : 33- (0)4 67 54 87 00
E-Mail : sylvie.durrieu@teledetection.fr

Année de début du projet : 2008 Année de fin du projet : 2010

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

BILAN FINANCIER en kF HT

1-Montant notifié par l'INSU pour le projet :

31 k€ HT

2-Autres crédits attribués par l'INSU et utilisés dans le cadre du projet (mi-lourds, campagnes à la mer, temps télescopes, etc...) :

3-Autres sources de financement que l'INSU (préciser l'origine et le gestionnaire)
Financement venant en support d'un financement TOSCA sur le projet ExFOLIO (Etude eXpérimentale des Formes d'Onde LIdar pour l'Observation des infrastructures et de l'environnement) 2006-2010- Gestionnaire TETIS- responsable scientifique S. Durrieu : **420.9 k€ sur 5 ans (2006-2010)**
Sur ce montant **53. 4 k€** ont été reversés CEA/LMD pour contribuer au développement du prototype Lidar et réaliser les tests et les premiers vols sur canopée forestière.

L'analyse des données acquises a été réalisée dans le cadre d'un post-doctorat au LMD (J. Cuesta), d'une thèse au Cemagref (T. Allouis- thèse co-financée par le Cemagref et la Région Languedoc-Roussillon), d'un stage de master II réalisé au CEA et prolongé par un CDD au Cemagref (M. Bouvier).

Les travaux de modélisation à partir de maquettes d'arbre ont été réalisés par l'UMR AMAP (Exfolio + PNTS)

4- Utilisation des moyens financiers
L'utilisation des moyens financiers se répartit comme suit :

Contribution à la conception du prototype Lidar et campagne d'acquisition des données Lidar :
14.5 k€ HT

Equipement pour mesures forestières
0.5 k€ HT

Missions et Conférences
10 k€ HT

Fonctionnement
6 k€ HT

Total :
31 k€ HT

TOTAL DES MOYENS FINANCIERS MIS EN OEUVRE (1+2+3) :
84.4 K€ HT

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

PERSONNEL PARTICIPANT AU PROJET

Nom	Laboratoire	%	Statut	Rôle dans le projet
Albrech Laurent	UMR TETIS (Cemagref)	10 %	TS	Acquisition données terrain- Intégration d'appareils photos numériques à la charge utile- Calibration
Allouis Tristan	UMR TETIS (Cemagref)	20 %	IE – CDD Exfolio	Participation à l'acquisition de données. Calibration. Traitement et analyse des données
Bretar Frédéric	IGN	Expertise	Ingénieur	Géoréférencement et traitement signal
Caraglio Yves	UMR AMAP (Cirad)	5 %	DR	Choix et calage terrain des modèles architecturaux de plantes
Chauve Adrien	UMR TETIS (Cemagref)	20 %	Doctorant Cemagref / IGN	Modélisation du train d'onde LiDAR et adaptations pour simuler un capteur similaire au prototype utilisé-
Chazette Patrick	LMD	5 %	DR	Préparation missions ULM (intégration des différents capteurs, installation charge utile, vols tests et acquisitions)
Cuesta Juan	LMD	15 %	Post doc	Conception prototype LiDAR et prétraitement des données
Dauzat Jean	UMR AMAP (Cirad)	10 %	DR	Modélisation du train d'onde LiDAR et analyse des résultats
Durrieu Sylvie	UMR TETIS (Cemagref)	20 %	CR	Responsable scientifique. Traitement des données LiDAR et évaluation de leur potentiel pour caractériser la végétation.
Edouart Dimitri	LMD	Expertise	IR2	Consultant
Estevan Lætitia	LMD	15 %	IE	Conception prototype et installation de la charge utile sur ULM
Flamant Pierre H.	LMD	10 %	DR1	Coordinateur pour la réalisation du prototype et acquisition des données LiDAR par ULM
Pierrot Deseilligny Marc	UMR TETIS (Cemagref)	10 %	DR	Pré traitements et traitement des données (géoréférencement, déconvolution, calibration…)
Sanak Joseph	LMD	5 %	IR	Préparation missions ULM (installation charge utile, vols tests, acquisition données)
Véga Cédric	UMR TETIS (Cemagref)	15 %	Post Doc	Traitement et analyse des données – Extraction de paramètres forestiers et évaluation de leur qualité
Total équivalent temps plein		1,6		

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

SOMMAIRE

1 Résumé du Contexte 5
2 Objectif 5
3 Description des travaux prévus 6
4 Travaux réalisés et résultats obtenus 6
4.1 Campagnes de mesures avec le prototype Lidar et acquisition de données terrain de référence 6
4.1.1 Prototype Lidar 6
4.1.2 Campagne de mesure Lidar 7
4.1.3 Données de référence terrain 7
4.2 Analyse des formes d'onde Lidar 8
4.2.1 Prétraitements : géoréférencement des données 8
4.2.2 Premières analyses des signaux bruts au niveau de la parcelle forestière 8
4.2.3 Premières estimations de la biomasse forestière par analyse du signal brut [Bouvier M., 2010] 11
4.2.4 Calcul de profils de végétation et extraction de paramètres forestiers au niveau de placettes et de parcelles forestières 14
4.3 Approche par modélisation 15
4.3.1 Modèle de simulation 16
4.3.2 Etude de l'impact des caractéristiques systèmes et de la végétation sur le signal Lidar 16
4.3.3 Etude de l'impact de la taille d'empreinte sur l'estimation de la biomasse au moyen de simulations à partir des données expérimentales acquises avec le LAUVA 20
5 Bilan du projet : 23
5.1 Avancées et Perspectives 23
5.2 Production scientifique liée au projet 26

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

1 RESUME DU CONTEXTE

Le LiDAR (Light Detection And Ranging) est une technique de télédétection active basée sur l'émission réception d'un faisceau laser. Elle est particulièrement prometteuse pour la caractérisation et le suivi des forêts. En effet, en raison du fort pouvoir de pénétration du faisceau laser dans le couvert, le signal enregistré par les systèmes LiDAR permet de décrire la structure en 3D de la végétation forestière, structure qui joue un rôle fondamental dans le fonctionnement des écosystèmes. Cette information tient donc une place clef parmi les informations nécessaires à la définition et à la mise en œuvre des pratiques de gestion durable de la ressource forestière. Cette information n'est aujourd'hui accessible qu'au moyen d'un important travail de terrain qui reste limité quand aux surfaces couvertes et l'utilisation de systèmes lidar embarqués devrait permettre d'accéder à la connaissance de la structure forestière sur de grandes surfaces et de façon plus rapide et moins coûteuse. Cependant, pour réaliser pleinement le potentiel de caractérisation des surfaces continentales et en particulier des zones forestières à partir de données LiDAR des recherches sur la qualification, l'inversion et l'analyse du signal sont encore nécessaires. C'est dans ce contexte que le projet ExFOLIO (Etude eXpérimentale des Formes d'Onde LIdar pour l'Observation des infrastructures et de l'environnement) avait été soumis au TOSCA. Les objectifs scientifiques de ce projet étaient (1) d'améliorer les connaissances dans le domaine de l'extraction d'information à partir du signal Lidar (2) de contribuer à la spécification de capteurs LiDAR de nouvelle génération embarqués sur satellites.

Le projet soumis au PNTS venait en support au projet ExFOLIO pour travailler sur un volet spécifique : permettre une première évaluation de la capacité de capteurs LiDAR multifonctions atmosphère/végétation pour décrire la végétation. Un des enjeux du développement de tels capteurs est de progresser dans la compréhension et le suivi des phénomènes à l'interface atmosphère/végétation, et en particulier des mécanismes qui interviennent dans le changement climatique afin de parvenir à renforcer le potentiel de régulation du changement climatique par les forêts car.

2 OBJECTIF

L'objectif principal de ce projet intitulé « Evaluation d'un prototype LiDAR Atmosphère/Végétation pour la caractérisation de la végétation forestière » était de mettre en place des expérimentations pour réaliser les premières mesures au-dessus de végétations arborées obtenues au moyen d'un prototype de mini LiDAR à vocations multiples (atmosphère/végétation) et de réaliser une première évaluation du potentiel de ce type de capteur pour caractériser la structure de la végétation forestière

En parallèle était prévue une étude théorique basée sur l'utilisation de modèles de simulation du signal LiDAR développés par l'UMR AMAP dans le cadre du projet ExFOLIO financé par le TOSCA. Ces modèles devaient permettre d'évaluer l'influence de différents facteurs (caractéristiques du capteur, conditions d'acquisition et type de végétation) sur la forme d'onde LiDAR. Ils permettront ainsi d'aider à la définition des spécifications de futurs prototypes préfigurant des LiDAR satellitaires atmosphère/végétation.

Ce projet s'inscrivait donc principalement dans les 2 axes suivants, définis comme prioritaires par le PNTS :

- études exploratoires pour des instruments qui pourraient être placés en orbite dans le futur (et développement de méthodes de traitement adaptées)
- études de physique de la mesure (développement et validation de modèles de simulation du signal LiDAR).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

3 DESCRIPTION DES TRAVAUX PREVUS

Pour atteindre les objectifs fixés les travaux suivants étaient prévus :

(1) Réalisation de campagnes de mesure avec le prototype LiDAR

(2) Analyses exploratoires des formes d'onde LiDAR en abordant les points suivants :
(2.1) développement de méthodes de restitution de profils de végétation,
(2.2) mise en relation des données LiDAR avec des descriptions de la végétation provenant de relevés de terrain
(2.3) évaluation comparative de l'apport spécifique de données dans différentes longueurs d'onde

(3) Etude complémentaire théorique à l'aide de modèles de simulation.

4 TRAVAUX REALISES ET RESULTATS OBTENUS[1]

4.1 Campagnes de mesures avec le prototype Lidar et acquisition de données terrain de référence

4.1.1 Prototype Lidar

Le Lidar initialement pressenti pour réaliser ces expériences était un prototype développé à partir d'un Lidar atmosphérique du LMD fonctionnant dans le vert (longueur d'onde d'émission de 523 nm).
Le prototype a été finalement développé par le CEA/LSCE sur la base du système lidar LAUVA, un lidar fonctionnant dans l'UV dédié à l'étude des aérosols atmosphériques. Au niveau atmosphérique ce lidar permet de caractériser les couches d'aérosol dans la basse et moyenne troposphère. Il est donc en mesure de fournir des informations sur les couches diffusantes au-dessus des surfaces forestières. Les informations structurales déduites de la mesure lidar sont une aide précieuse afin de déduire les flux de CO_2 à l'interface forêt/atmosphère. Un Lidar UV est donc susceptible d'apporter des informations nécessaires à l'évaluation à la fois des flux de carbone en forêt et du taux de carbone stocké (biomasse forestière). Ces informations sont fondamentales pour améliorer les connaissances sur le cycle du carbone et mieux évaluer le l'importance du puits de carbone que représente les forêts qui est à l'heure actuelle mal connue.
L'utilisation d'une longueur d'onde dans l'ultra-violet à 355 nm permet l'émission d'impulsions fortement énergétiques (16 mJ sur une durée de 6 µs à 20 Hz) tout en conservant la sécurité oculaire dès l'émission. On facilite ainsi l'utilisation de ce type de lidar à partir de petits porteurs de type ULM.

Les caractéristiques du prototype Lidar utilisé pour ce programme de recherche sont résumées dans le tableau suivant :

Longueur d'onde	355 nm
Energie de l'impulsion émise	16 mJ
Durée d'impulsion	5 ns
Fréquence d'émission	20 Hz pendant 1 seconde , 1 seconde sur 2
Divergence du faisceau	4 mrad
Fréquence d'échantillonnage du signal retour	200 MHz (échantillonnage vertical de 1.5 m)

[1] Ces résultats sont pour partie présentés aussi dans le compte rendu du projet ExFOLIO financé par le TOSCA

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

4.1.2 Campagne de mesure Lidar

Pour cette première expérience le massif landais, caractérisé par l'absence de relief et la simplicité structurale des peuplements, a été choisi comme zone d'étude pour faciliter l'analyse des premières données acquises par le prototype Lidar.
Le Lidar ultra-violet de nouvelle génération LAUVA a été embarqué à bord d'un ULM (Figure 1). En plus du Lidar et des instruments de géo-référencement, deux caméras à trois bandes (opérant dans le spectre visible, proche infrarouge et ultraviolet) ont complété la charge utile, avec comme but de restituer la structure tridimensionnelle de la canopée par stéréoscopie. Le Cemagref a intégré sur la plateforme un GPS différentiel (DGPS) afin d'améliorer le géoréférencement des mesures Lidar.

Deux sites ont été survolés en septembre 2008 dans le massif des Landes. L'un correspond à des parcelles expérimentales de l'INRA (bases de données de relevés terrain existantes). Un total de trois parcelles d'environ 500 x 500 m^2 composées principalement de pins maritimes de plusieurs âges a été échantillonné suivant différentes configurations expérimentales. Des observations à deux altitudes de vol, 300 et 500 m., ont été effectuées en visée nadir et à 30°, donnant une empreinte Lidar au sol de 2,4 et 4 m de diamètre, respectivement (Cuesta et al., 2010).

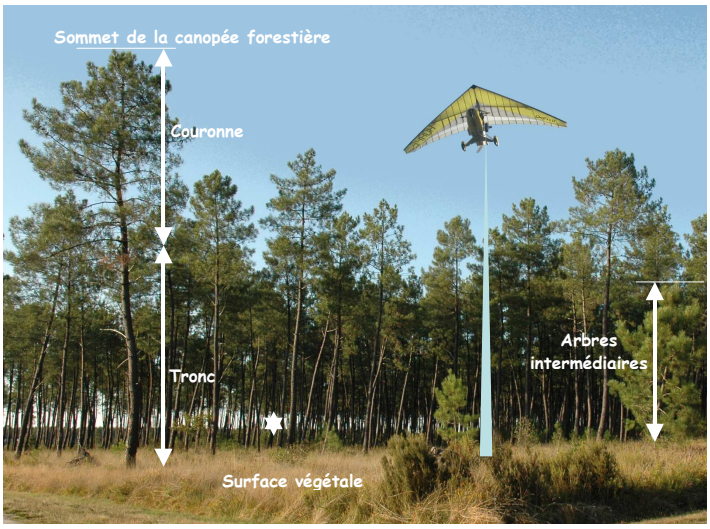


***Figure 1** : Expérience dans les Landes pour la mesure canopée par Lidar LAUVA fonctionnant dans l'UV embarqué sur ULM*

A 300 m, avec une vitesse de vol de 30m/s, les caractéristiques du système ont conduit à des séries de mesures continues sur 30 m alternant avec une absence de mesures sur les 30 m suivants. Les « trous » ont été partiellement comblés grâce à l'utilisation d'un ULM, appareil facilement manœuvrable.

4.1.3 Données de référence terrain

Des points de référence ont été relevés au DGPS sur les différentes zones survolées.
Des données de référence ont été mises à disposition par l'INRA sur la parcelle expérimentale suivie par l'INRA (parcelle de Bray).
Sur les autres sites des données d'inventaire ont été acquises par des relevés de terrain réalisés par le Cemagref sur 8 placettes forestières carrées de 30 m x 30 m en avril 2009. Ces placettes ont été choisies afin de disposer d'un échantillon de l'ensemble des peuplements présents sur le site d'étude, à savoir trois classes d'âge (jeunes, moyens, âgés) et deux types de semis (plantations, semis naturels). Afin d'optimiser

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

la campagne de mesure deux protocoles différents ont été suivis, selon qu'il s'agissait de plantations ou de semis naturels.
Pour les semis naturels nous avons mesuré, pour chaque arbre, le diamètre du tronc à 1,30 m, la hauteur totale, la hauteur de la base du houppier, ainsi que la position géographique de la base du tronc. Les largeurs de houppiers dans deux directions ont aussi été mesurées pour un arbre sur 5 dans la placette.
Pour les plantations, dans lesquelles les arbres présentent des caractéristiques homogènes, le diamètre du tronc à 1,30 m et la position géographique de chaque arbre ont été mesurés. La hauteur totale et la hauteur de la base du houppier ont été mesurées pour un arbre sur 3, et les largeurs de houppiers dans deux directions pour un arbre sur 5.

Fin 2009, le traitement des images très haute résolution (infra rouge couleur et UV) acquises en même temps que les données Lidar a été réalisé ; le but était d'obtenir par photogrammétrie un modèle numérique de surface de référence. Mais les essais réalisés ont été infructueux. Les méthodes de corrélation automatique fonctionnent mal généralement sur les zones forestières et le problème était ici accentué par la faible emprise des images (difficulté de trouver des points d'amer) et la forte instabilité de l'ULM impliquant de grands changements d'orientation externe d'une image à l'autre.

4.2 Analyse des formes d'onde Lidar

4.2.1 Prétraitements : géoréférencement des données

Avant d'analyser le signal en lien avec les données terrain, un travail important consiste à géoréférencer les données. Le géoréférencement réalisé en 2008 ne prenait en compte que les données acquises par le GPS et la centrale inertielle de l'ULM. Avec ces informations la précision de positionnement du signal était de l'ordre de la dizaine de mètres.

En 2009 le géoréférencement a été amélioré en intégrant, après les avoir post-traitées, les informations acquises par le DGPS embarqué à bord de l'ULM en même temps que le Lidar. La précision dans la postion de l'ULM est améliorée d'une part puisque le DGPS donne des mesures précises au centimètre près, et d'autre par puique nous disposons de 5 mesures DGPS par secondes, contre une seule pour le GPS classique. Un algorithme de traitement intégrant les informations acquises par la centrale inertielle et par le DGPS a donc été développé. Il permet de mettre en relation la distance mesurée par le Lidar avec les angles d'orientation de l'ULM (roulis, tangage, lacet) donnés par la centrale inertielle, ainsi qu'avec sa position dans un référentiel global. Ces données sont synchronisées à l'aide du temps GPS. Entre deux temps GPS, des interpolations des positions sont effectuées. Cette étape permet d'obtenir le positionnement à 5 m près de la mesure Lidar au sol, à partir de la position du capteur embarqué.

4.2.2 Premières analyses des signaux bruts au niveau de la parcelle forestière

Ce travail réalisé par l'équipe Limag (LMD-LSCE) porte particulièrement sur la parcelle de Bray pour laquelle l'INRA a fourni les données de terrain qui nous ont permis de valider les mesures aéroportées Lidar acquise en 2008.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

La première étape de l'analyse est tirée des travaux initiaux de Chazette et al. (2001)[2] sur la détection des nuages denses. Elle consiste à déterminer un seuil au-delà duquel on identifie une structure géophysique sur le signal Lidar. Ce seuil est fixé en tenant compte de la statistique des signaux de bruit et des signaux utiles. Une illustration est présentée sur la Figure 2 pour la parcelle de Bray (Cuesta et al., 2010).

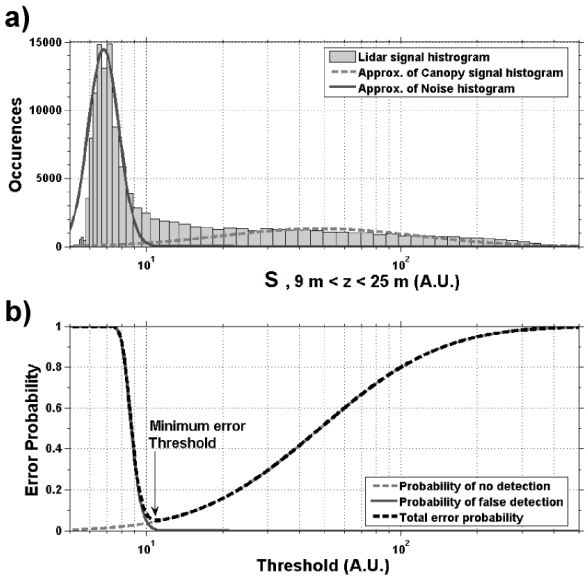


Figure 2 :
(a) *Répartition statistique des signaux Lidar de bruit et utiles pour des altitudes comprises entre 9 et 25 m. Des distributions lognormales ont été utilisées afin de modéliser ces deux répartitions.*
(b) *Probabilités de non détection (ligne pointillée en gris) et de fausse alarme (ligne pointillée en noir).*

.

Le seuil est placé de telle manière que l'on minimise la probabilité d'erreur qui est une combinaison des probabilités de non détection et de fausse alarme. Dans le cas présent, l'erreur reste inférieure à 5% ce qui nous assure de la qualité du seuil utilisé.

Le résultat de la détection des structures de la canopée de la parcelle de Bray est présenté sur la Figure 3 pour une visée au nadir avec une altitude de vol de 300 m par rapport au sol.

On a discerné le sommet de la canopée du sommet apparent des arbres. Ce dernier est défini via un ensemble de tir qui est une fonction de la distance entre les arbres. Dans notre cas, le spot Lidar au sol rencontre le véritable sommet d'un arbre environ tous les 5 à 6 tirs laser (la distance moyenne entre chaque arbre est de l'ordre de 5 m). Le tableau 2 résume les principaux résultats en tenant compte des différentes géométries de mesure qui ont été adoptées durant l'expérience. On notera une sous estimation de l'altitude de la canopée pour des mesures effectuées à partir de 500 m d'altitude. Celle-ci est liée à la taille de l'empreinte au sol qui augmente de 2.4 à 4 m. environ. Néanmoins, les résultats restent cohérents au niveau de la distribution des hauteurs.

Les comparaisons statistiques aux observations in situ conduites par l'INRA sur la parcelle de Bray sont présentées sur la Figure 4 (page précédente). On observe un biais de l'ordre de 1 m entre les mesures in situ et les mesures Lidar. Ce biais reste faible et il est très dépendant de la résolution verticale actuelle du Lidar. On constatera qu'il n'y a pas de grandes différences pour la détection de la base des couronnes d'arbre en fonction des différentes géométries de mesure.

[2] Chazette P., J. Pelon et G. Mégie, 2001, Determination of structural parameters of atmospheric scattering layer using spaceborne backscatter lidar, Appl. Opt., 40, 3428-3440.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

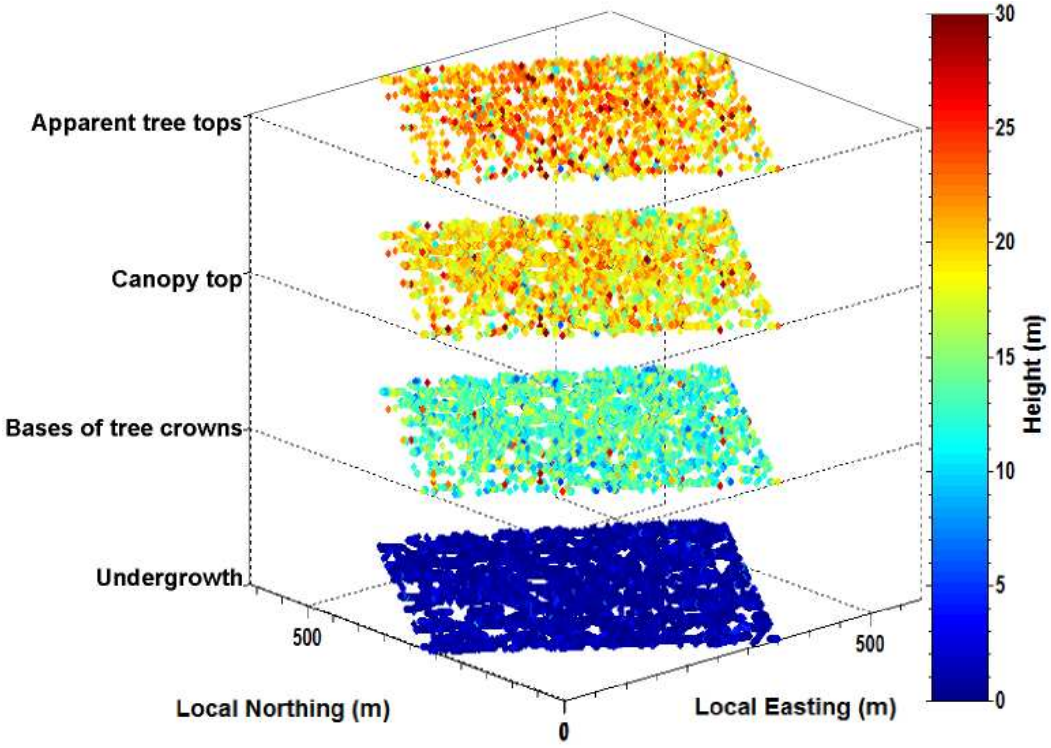


Figure 3 : *Distribution verticale de la végétation de la parcelle de Bray vue par le système lidar LAUVA à bord d'un ULM.*

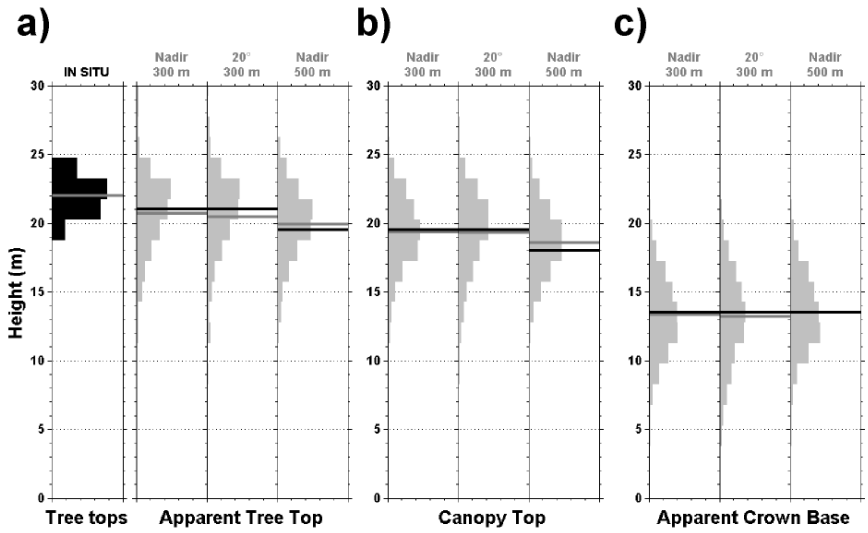


Figure 4 *: Répartitions statistiques des paramètres structuraux de la parcelle de Bray. La figure de gauche correspond aux mesures in situ de l'INRA sur le sommet des arbres. Les résultats associés aux différentes configurations de mesure sont présentés. Sur chaque distribution apparait en noir la valeur moyenne et en gris la valeur médiane.*

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Tableau 2 : *Comparaison des paramètres structuraux de la parcelle de Bray. La première ligne correspond aux mesures in situ de l'INRA. Les autres lignes sont les résultats obtenus à partir du lidar LAUVA embarqué sur ULM. Les écarts types sont donnés entre parenthèses.*

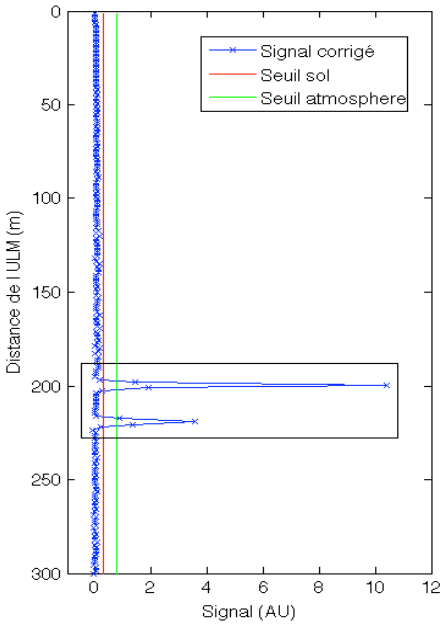
Structural parameter	Retrieval method	All parcel	NE quadrant	NW quadrant	SW quadrant	SE quadrant
Tree top	In situ	22.0/22.0 (1.2)	22.1/21.9 (0.9)	-	21.6/21.5 (1.2)	22.1/22.3 (1.2)
Apparent tree top	300 m Nadir	21.2/21.0 (4.0)	21.1/21.0 (4.1)	21.3/21.0 (3.6)	21.1/21.0 (4.6)	21.2/21.0 (3.5)
	300 m 20°	20.5/21.0 (3.4)	19.6/19.5 (3.4)	20.8/21.0 (3.6)	21.9/22.5 (2.7)	20.0/21.0 (3.5)
	500 m Nadir	19.9/19.5 (2.7)	20.4/21.0 (2.4)	20.3/21.0 (2.5)	19.8/19.5 (2.6)	19.5/19.5 (3.0)
	500 m Nad. opt.	20.7/21.0 (3.3)	20.9/21.0 (2.8)	20.9/21.0 (3.2)	20.5/21.0 (3.3)	20.5/21.0 (3.6)
Canopy Top	300 m Nadir	19.7/19.5 (3.1)	19.9/19.5 (3.0)	19.6/19.5 (2.9)	19.7/19.5 (3.6)	19.5/19.5 (3.1)
	300 m 20°	19.3/19.5 (3.2)	18.4/18.0 (3.3)	19.5/19.5 (3.4)	19.9/19.5 (2.9)	19.2/19.5 (2.9)
	500 m Nadir	18.6/18.0 (2.6)	18.8/19.5 (2.6)	18.9/19.5 (2.5)	18.5/18.0 (2.6)	18.3/18.0 (2.6)
	500 m Nad. opt.	19.3/19.5 (2.8)	19.4/19.5 (2.7)	19.5/19.5 (2.8)	19.2/19.5 (2.8)	19.2/19.5 (2.9)
Apparent crown base	300 m Nadir	13.5/13.5 (3.4)	13.2/13.5 (3.0)	13.7/13.5 (3.2)	13.8/13.5 (3.9)	13.0/13.5 (3.1)
	300 m 20°	13.2/13.5 (3.5)	12.5/12.0 (3.6)	13.2/13.5 (3.7)	13.7/13.5 (3.5)	13.2/13.5 (3.4)
	500 m Nadir	13.5/13.5 (2.9)	13.5/13.5 (2.9)	13.9/13.5 (2.7)	13.5/13.5 (2.8)	13.4/13.5 (3.0)
	500 m Nad. opt.	13.6/13.5 (3.2)	13.5/13.5 (3.1)	13.8/13.5 (3.0)	13.5/13.5 (3.1)	13.6/13.5 (3.3)

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

4.2.3 Premières estimations de la biomasse forestière par analyse du signal brut [Bouvier M., 2010]

Durant un stage de cinq mois au LSCE[3] au sein de l'équipe Lidar, Marc Bouvier a poursuivi sur la base des résultats précédents le travail sur l'analyse des données du Lidar LAUVA[4]. Son travail a consisté à développer un algorithme de traitement du signal pour restituer la structure de la canopée en trois dimensions qui a été appliqué aux données collectées lors de la campagne de mesures effectuée en 2008, dans les Landes, et qui est actuellement utilisé pour traiter les données des test du nouveau lidar canopée sur la forêt de Barbeau (acquisition en novembre 2010, Chazette et al., EGU 2011).
Comme pour les travaux précédents les pics d'intensités au sein de l'onde rétrodiffusée sont séparés du bruit (atmosphérique et instrumental) par un seuillage de l'intensité, qui est ici différent pour le sol et l'atmosphère (Figure 5). Les échos sont extraits dès qu'ils dépassent un seuil préalablement fixé. Un algorithme similaire a déjà été développé pour les nuages par Chazette et al. [2001][5].

[3] Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement
[4] Lidar Atmosphérique UltraViolet Aéroporté
[5] Chazette, P., Pelon, J., Mégie, G., (2001). Determination of structural parameters of atmospheric scattering layer using spaceborne backscatter lidar, Appl. Opt., 40, 3428-3440.



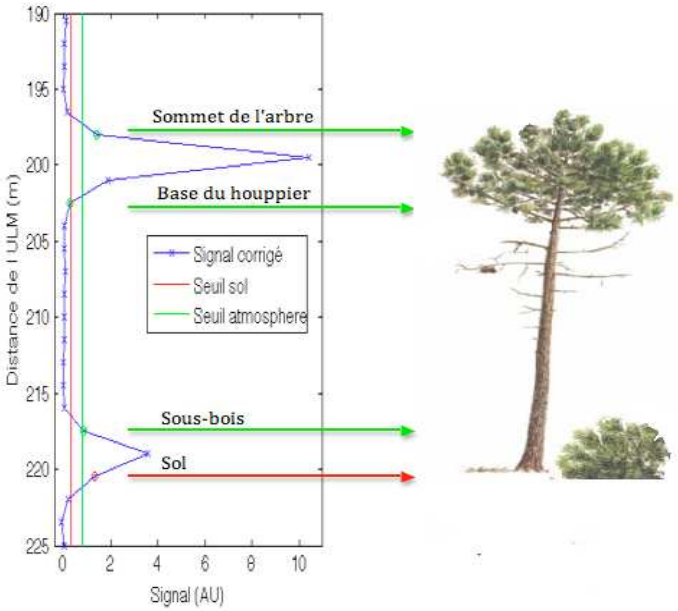
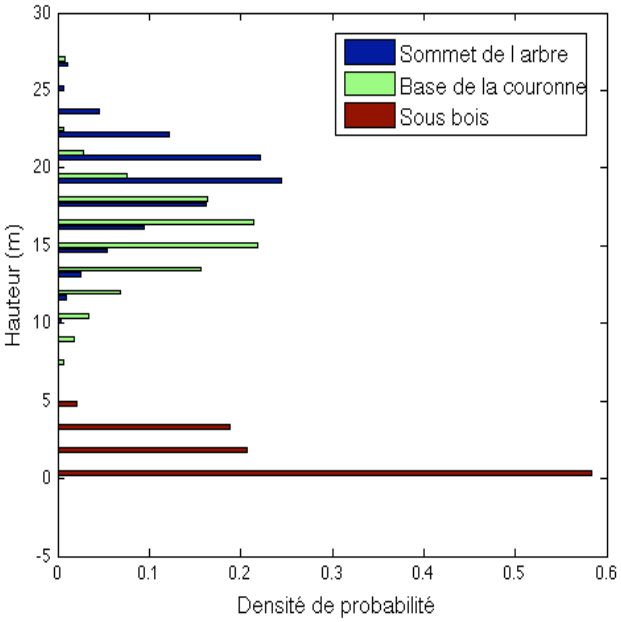


Figure 5 : *Profil Lidar d'un arbre* ***Figure 6 :*** *Agrandissement du profil lidar*

L'aspect visuel des pins confirme la bonne cohérence entre le signal et la structure des arbres avec un premier écho correspondant au houppier relativement fin et un sous-bois concentré dans les cinq premiers mètres au dessus du sol (Figure 6). Les résultats obtenus permettent ainsi une caractérisation statistique cohérente de la répartition verticale de la canopée forestière de chacune des trois parcelles survolées par l'ULM embarquant le LAUVA (Figure 7).



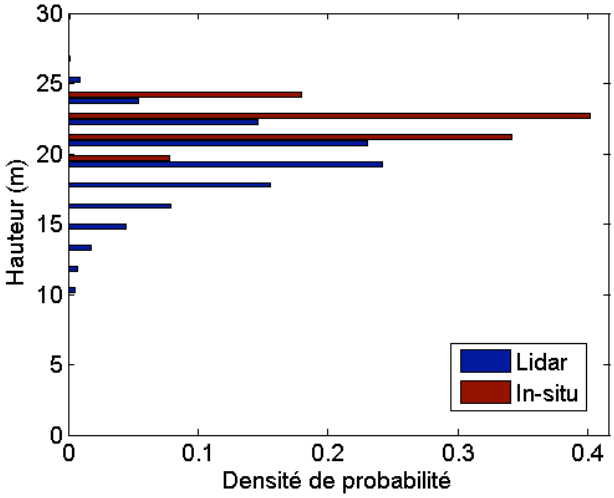


Figure 7 : *Histogrammes des hauteurs mesurées sur la parcelle de Bray*

Figure 8 : *Histogramme de la hauteur du sommet des arbres mesurée par lidar et par l'INRA*

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Les comparaisons entre les mesures Lidar et les mesures de terrain effectuées par l'INRA sur la parcelle de Bray, permettent d'estimer une incertitude de l'ordre de la résolution verticale du Lidar (1,5 m) pour la restitution de la hauteur moyenne de la canopée forestière (Figure 8).

A partir de la connaissance de la structure verticale de la canopée il est possible d'estimer la biomasse des parcelles étudiées. L'estimation de la biomasse et du stock de carbone est essentielle pour comprendre le rôle des forêts et notamment évaluer leur potentiel à agir comme puits de carbone et à ralentir ainsi les processus du changement climatique.
Afin d'évaluer la biomasse à partir des hauteurs mesurées par le Lidar, plusieurs études ont été réalisées depuis celle de Maclean, G.A. & Krabill, W.B. [1986.][6]. Des relations empiriques entre des indices de hauteur et la quantité de biomasse aérienne ont été établies. Même si la qualité de la restitution de la biomasse est très dépendante du type d'essence, les erreurs estimées sont faibles et ne sont pas significatives au niveau statistique [Lefsky et al., 1997][7].

Means E.J. et al. [1999][8] ont étudié, à partir de données Lidar, la biomasse d'une forêt de conifères du Nord-Ouest des États-Unis, afin d'établir une relation entre celle-ci et la hauteur de la canopée. La représentation de la biomasse aérienne sur la parcelle de Mimizan (Figure 9) s'appuie sur ces travaux. La parcelle est découpées en placettes régulières de 30 m. x 30 m. La biomasse calculée varie de 20 à 500 t.ha^{-1} d'une placette à l'autre, avec une valeur moyenne de 240 ± 79 t.ha-1. L'incertitude calculée permet de constater que l'estimation reste raisonnable. Néanmoins, ce calcul d'erreur ne prend pas en compte le biais lié à l'utilisation d'équations empiriques qui n'ont pas été établies avec des pins maritimes (Stage de M. Bouvier, LSCE 2010).

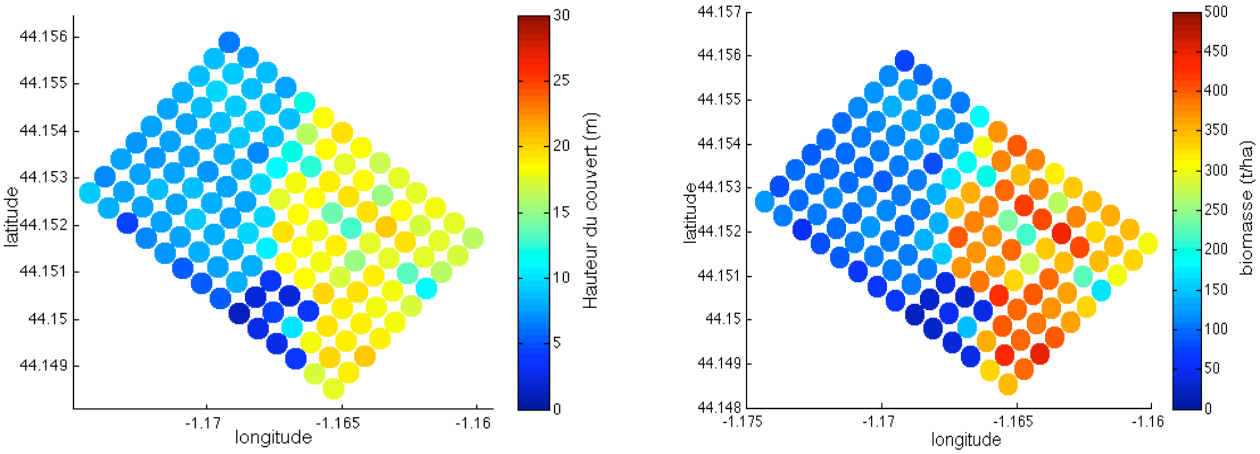


Figure 9 : *Gauche : Hauteur du sommet des arbres par sous-parcelles de 30x30m (parcelle de Mimizan)- Droite : Évaluation de la biomasse (parcelle de Mimizan).*

[6]Maclean, G.A., Krabill, W.B. 1986. Gross-merchantable timber volume estimation using an airborne LIDAR system. Can. J. Remote Sensing, 12, 7-18.
7 Lefsky M.A. 1997 Application of Lidar remote sensing to the estimation of forest canopy and stand structure. Ph.D., Dissertation Abstracts International, 58-03.
[8] Means J.E, Acker S.A., Harding D.J., Blair J.B., Lefsky M.A., Cohen W.B., Harmon M.E. and McKee A., 1999. Use large footprint scanning airborne lidar to estimate forest stand characteristics in the Western cascades of Oregon, Remote Sens. Environ.. 67:298–308

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

4.2.4 Calcul de profils de végétation et extraction de paramètres forestiers au niveau de placettes et de parcelles forestières

Suite à cette première étude, des travaux complémentaires sur le traitement des données LAUVA ont été réalisés dans le cadre de la thèse de T. Allouis (Cemagref-TETIS) et ont nécessité au préalable l'acquisition de données terrains sur plusieurs placettes forestières.

La méthode développée cherche à restituer des profils de végétation à partir du signal Lidar brut en corrigeant l'effet d'atténuation de l'intensité le long de son parcours dans la végétation. Faisant l'hypothèse que la canopée réfléchit le laser de la même manière qu'un milieu turbide, l'atténuation du signal est alors corrigée par une fonction logarithmique (modèle d'inversion de MacArthur et Horn (1969)[9] :

$$D_{r_i} = \ln\left(\frac{\sum_{r_i}^{r_{max}} P(r)}{\sum_{r_{i+1}}^{r_{max}} P(r)}\right) \quad (1)$$

Où D_{r_i} est l'amplitude du signal corrigé à la distance r_i depuis l'avion avec $i \in [1, r_{max-1}]$, et $P(r)$ la puissance enregistrée en fonction de la distance. La correction est calculée pour chaque intervalle ente deux distances successives depuis l'atmosphère jusqu'à r_{max}.

Cette correction permet donc de relever l'amplitude du signal au fur et à mesure de sa descente le long de la colonne de végétation (Figure 10) :

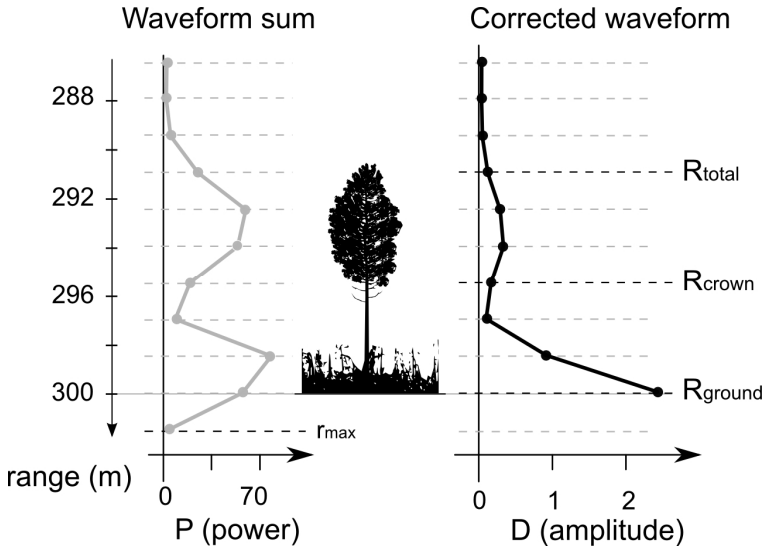


***Figure 10** : Un arbre schématique (centre) avec un exemple de signal lidar (gauche), le signal corrigé de l'atténuation (droite) ainsi que les positions de la hauteur totale (R_{total}), la hauteur de houppier (R_{crown}) ainsi que la position du sol (R_{ground})*

[9] R. H. MacArthur, H. S. Horn, 1969, "Foliage Profile by Vertical Measurements", Ecology, vol. 50, pp. 802-804.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Cette méthode à été présentée puis publiée dans les actes de la conférence IEEE IGARSS 2010 [Allouis et al., 2010]. Des profils de végétation caractérisant les arbres à l'échelle de la placette ont été générés à partir des signaux Lidar et comparés à l'arbre moyen de la placette. Ces profils sont obtenus par sommation des formes d'ondes correspondant aux empreintes présentes dans une parcelle qui sont ensuite transformées en profils de végétation. Sur profils, une fois le niveau de bruit évalué, on a déduit dans un premier temps la hauteur totale moyenne des arbres de la placette ainsi que la hauteur moyenne de la base des houppiers avec une bonne correspondance avec les données terrain. Le passage en profils de végétation a montré son utilité en particulier pour la détection de la hauteur de la base du houppier, dont la précision a été améliorée d'environ 1,7 m par rapport aux résultats obtenus précédemment par analyse du signal brut.

Cette méthode de calcul de profils de végétation a été ensuite réutilisée sur deux parcelles des Landes. Le traitement du signal enregistré pour chaque empreinte, et non plus du signal cumulé sur une série de mesures lidar, a permis l'évaluation de nouveaux paramètres forestiers, en particulier la hauteur dominante, la reconnaissance du type semis (plantation, régénération naturelle) ainsi que la densité des arbres. Ces deux derniers paramètres ont été extraits en utilisant des outils géostatistiques (variogrammes) permettant d'étudier la distribution spatiale des mesures. L'extraction de ces paramètres apporte de nouvelles informations pouvant faciliter la cartographie des pratiques forestières [Allouis et al., 2011].

4.3 Approche par modélisation

Les travaux de modélisation du signal lidar ont été réalisés sous la direction de Jean Dauzat de l'UMR AMAP.

La démarche retenue consiste à utiliser des maquettes informatiques de plantes pour simuler les interactions d'un faisceau Lidar avec la végétation. La méthode du tracé de rayons a été choisie pour simuler ces interactions car c'est une méthode mécaniste qui permet de simuler les processus avec précision et un minimum d'hypothèses simplificatrices. La simulation d'un signal sur des maquettes informatiques de plantes présente divers intérêts dont, en particulier, la possibilité de mettre en relation le signal mesuré avec des caractéristiques biométriques du couvert végétal (par exemple sa biomasse ou son LAI) dans la mesure où les maquettes informatiques sont des objets complètement décrits en termes de géométrie 3D. La simulation permet en outre d'analyser les caractéristiques du signal pour différentes configurations matérielles et techniques.

Afin de disposer d'un outil de simulation adapté à la simulation d'un signal Lidar sur des représentations virtuelles de couverts végétaux, un modèle de tracé de rayons, "ART" (Archimed Ray-Tracing), a été développé (partie 4.3.1).

Les premières simulations réalisées ont permis d'étudier la contribution des rediffusions dans des couverts végétaux multiples au signal Lidar pour différentes configurations systèmes ainsi que le lien entre le signal rétrodiffusé et le LAI (partie 4.3.2).

En complément, le Cemagref a réalisé des simulations à partir des données expérimentales acquises avec le LAUVA afin d'évaluer l'impact de la taille de l'empreinte sur l'estimation de la biomasse (partie 4.3.3).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

4.3.1 Modèle de simulation

Le modèle ART a été utilisé pour analyser la composition d'un signal "full waveform" en fonction des configurations techniques et d'acquisition.

Les premières séries de formes d'ondes simulées ont été réalisées sur des plantations d'Eucalyptus. Une étude passée a en effet permis la modélisation du développement architectural de plusieurs clones d'eucalyptus dans une plantation au Congo. Cela a permis de simuler des arbres avec le logiciel AMAPsim et de reconstituer une parcelle conforme aux observations de terrain (Figure 11)

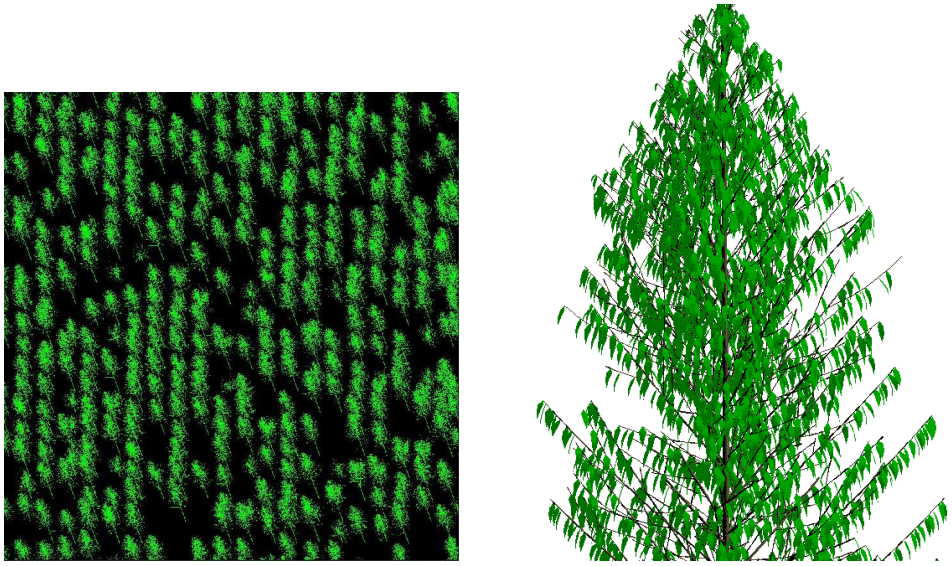


***Figure 11** : Reconstitution d'une plantation d'eucalyptus et zoom sur un individu.*

Les simulations sur cette plantation d'eucalyptus ont permis d'avoir un premier aperçu de l'impact des caractéristiques systèmes et de la structure de végétation sur le signal lidar.

4.3.2 Etude de l'impact des caractéristiques systèmes et de la végétation sur le signal Lidar

Les principaux résultats de ce travail ont été présentés au colloque SFPT « LaserScanning 2009 » les 20 et 21 janvier à l'ESGT au Mans.

Les questions abordées concernaient en particulier :

- *La part des rediffusions multiples dans le signal en fonction des configurations techniques du système*

Les résultats montrent que les rediffusions multiples peuvent contribuer significativement au signal renvoyé par la végétation (Figure 12). C'est en particulier le cas pour des longueurs d'onde dans le proche infrarouge pour lesquelles les feuilles ont un facteur de rediffusion très élevé (de l'ordre de 90%). Une conséquence de ce phénomène est un biais dans l'appréciation des distances aux cibles (et donc en l'occurrence du profil de la végétation) du fait que les photons rediffusés plusieurs fois avant de retourner vers le capteur parcourent des distances plus importantes que les photons rétrodiffusés directement vers le capteur. Certains photons parcourent ainsi des distances supérieures au parcours émetteur-sol-capteur, ce qui peut conduire à des artefacts de sol situés au dessous du niveau réel du sol.

La figure 13 montre l'impact plus important des rediffusions multiples dans le PIR comparé au visible.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

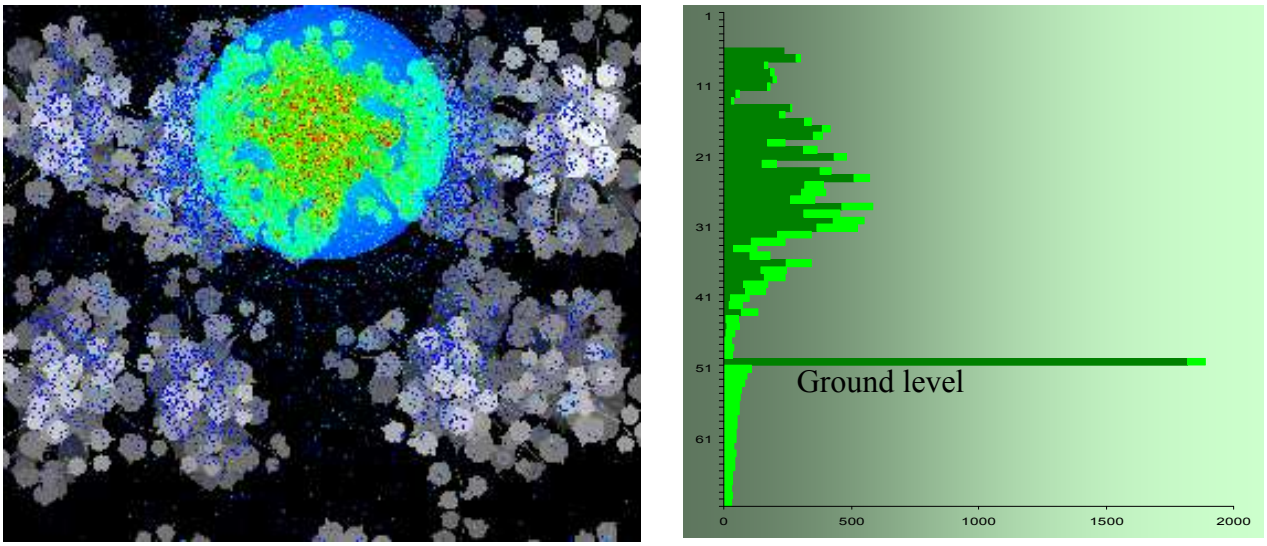


Figure 12 : Gauche : *simulation des rayons rediffusés en direction du capteur. La rétrodiffusion d'ordre 1 matérialise l'empreinte circulaire du faisceau. A la rétrodiffusion d'ordre 1 se rajoutent des rediffusions multiples émergeant de la zone éclairée par le faisceau ("surbrillances" en rouge) ou en dehors (points bleus).* ***Droite :*** *composantes du signal rétrodiffusé, d'ordre 1 (vert sombre) et d'ordre supérieur (vert clair).*

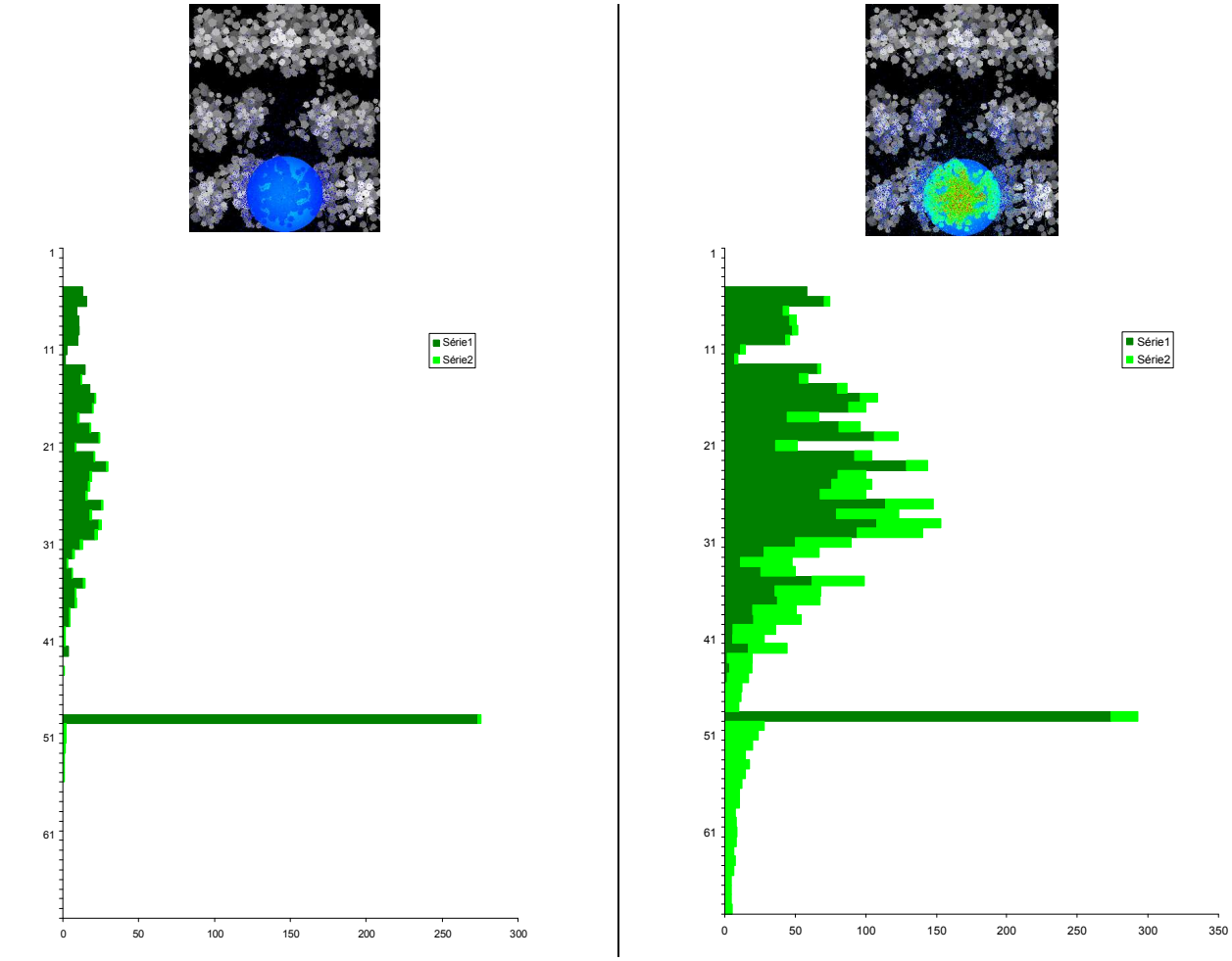


Figure 13 *: Effet de la longueur d'onde sur la part des rediffusions multiples (représentées en vert clair) pour des systèmes fonctionnant dans le vert (à gauche) et dans le PIR (à droite)*

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

L'effet des caractéristiques du faisceau (en termes intensité radiale du faisceau) a également été abordé. Les simulations fournissent une dynamique très fine du signal pour une impulsion instantanée. Le signal est retraité en post-traitement pour prendre en compte la forme de l'impulsion émise et la définition métrique des capteurs.

➢ *L'effet des configurations d'acquisition*

La part des rediffusions multiples dans le signal été évaluée en fonction de la taille de l'empreinte (Figure 14) et de la taille du champ de visée du capteur.

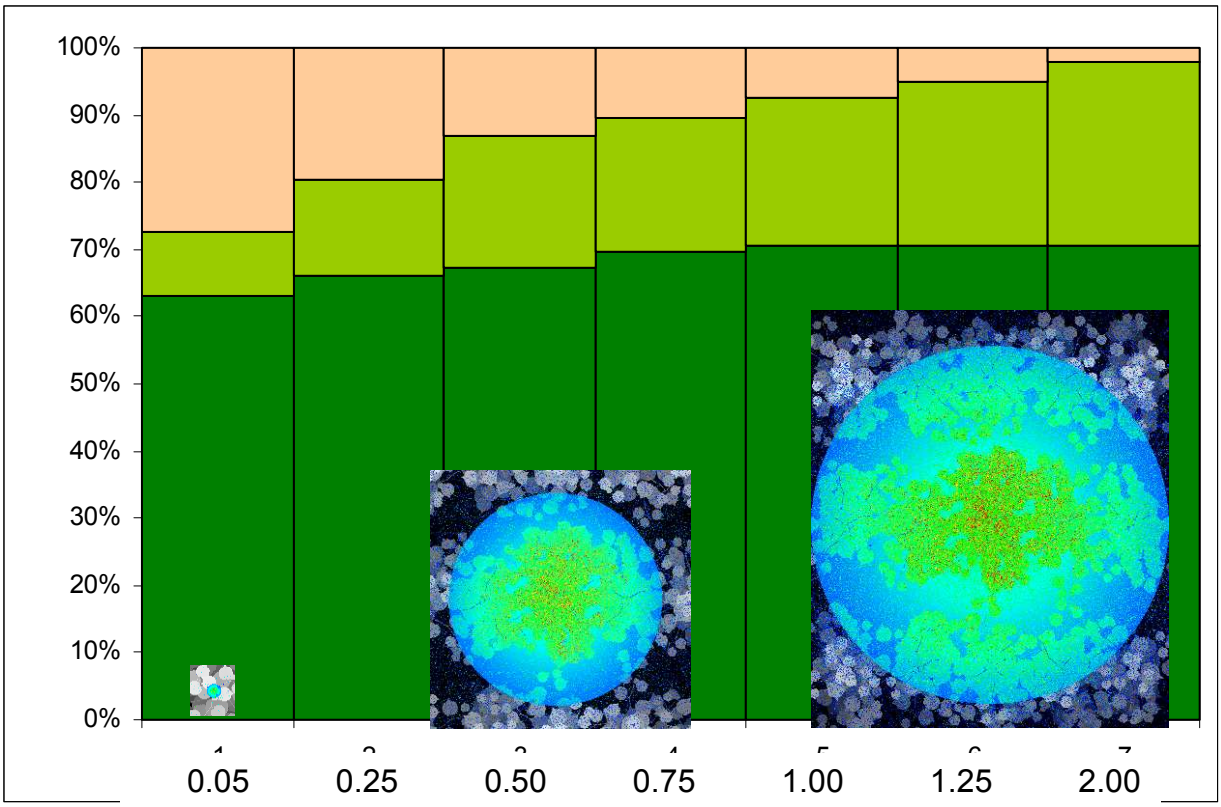


Figure 14 : *Effet de la taille d'empreinte (diamètre [m] en abcisse) sur les composantes du signal (ordonnées [%]) pour un lidar fonctionnant dans le proche infrarouge : rediffusions provenant de l'extérieur de l'empreinte en beige et de l'intérieur de l'empreinte en vert, ces dernières étant ici décomposées en rediffusions d'ordre 1 (vert foncé) et d'ordre 2 ou plus (vert clair).*

Des premières analyses ont été effectuées pour évaluer les informations apportées par densités et tailles d'empreintes variables. Les résultats obtenus sur un type de formation végétale ne peuvent cependant pas être extrapolés pour d'autres formations.

➢ Impact sur le signal de la structure de la végétation

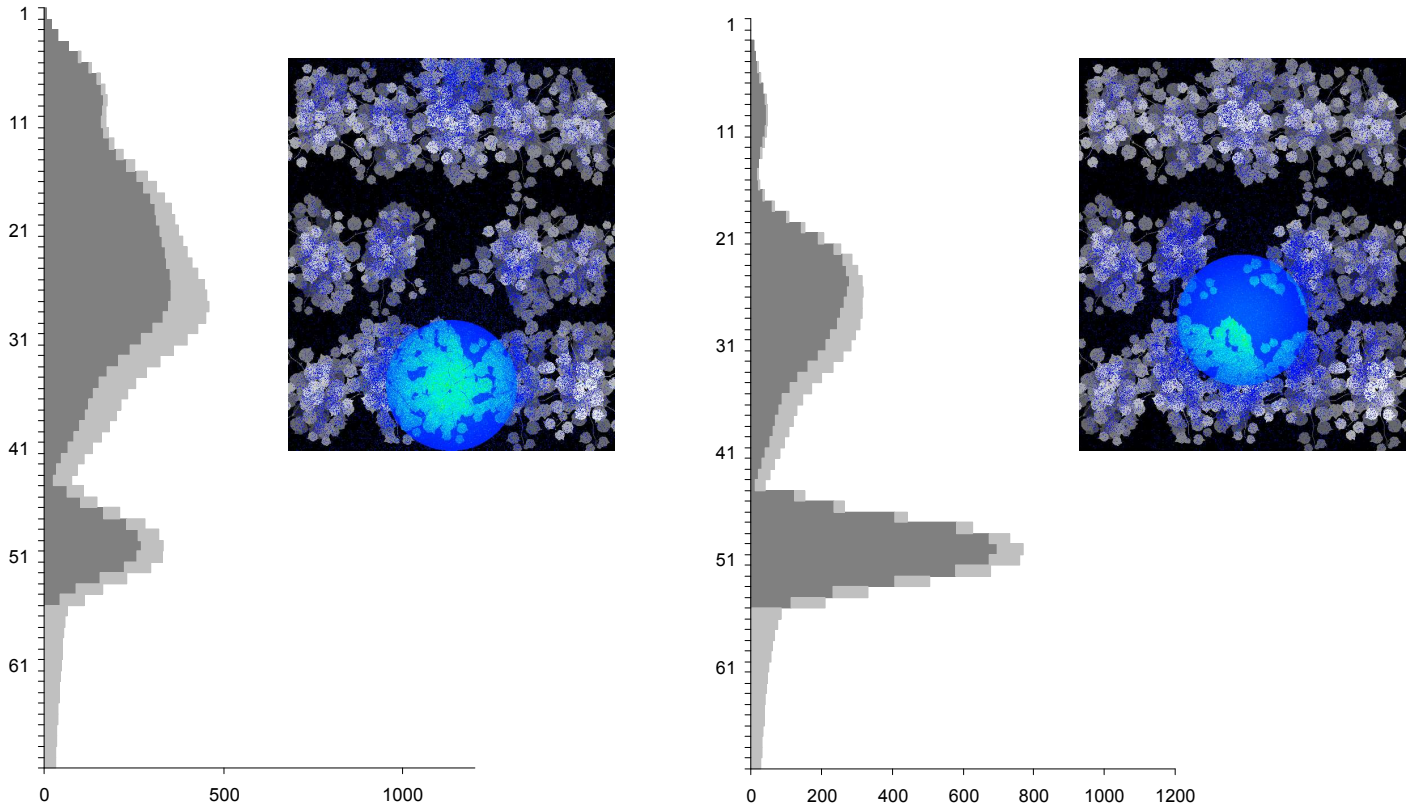
La figure 15 illustre la différence entre deux signaux obtenus sur des zones avec des taux de couverts différents. Avec un taux de couvert plus élevé, le signal sol diminue et la part des diffusions multiples augmente.

A partir des maquettes 3D de plantes il est possible d'analyser les relations entre le profil du signal et le profil de LAI. Un exemple de relation entre l'intensité du signal rétrodiffusé et le LAI est présenté figure 16. Dans cet exemple on peut montrer que la dynamique du signal retour est une fonction exponentielle

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

du profil de LAI, aussi bien pour les retours d'ordre 1 que pour les rediffusions multiples. La variable à ajuster pour la détermination du LAI est le coefficient K de la relation (coefficient analogue au coefficient d'extinction de la loi de Beer-Lambert) qui peut varier avec le type de formation végétale, de structure plus ou moins agrégative.

Cet exemple illustre le potentiel du signal Lidar pour reconstituer des profils verticaux de LAI à l'intérieur de la canopée.



CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Figure 15 : *Signal dans le PIR obtenu pour une empreinte tombant au niveau d'un arbre (à gauche) et pour une empreinte couvrant du sol nu et de la végétation (à droite).*

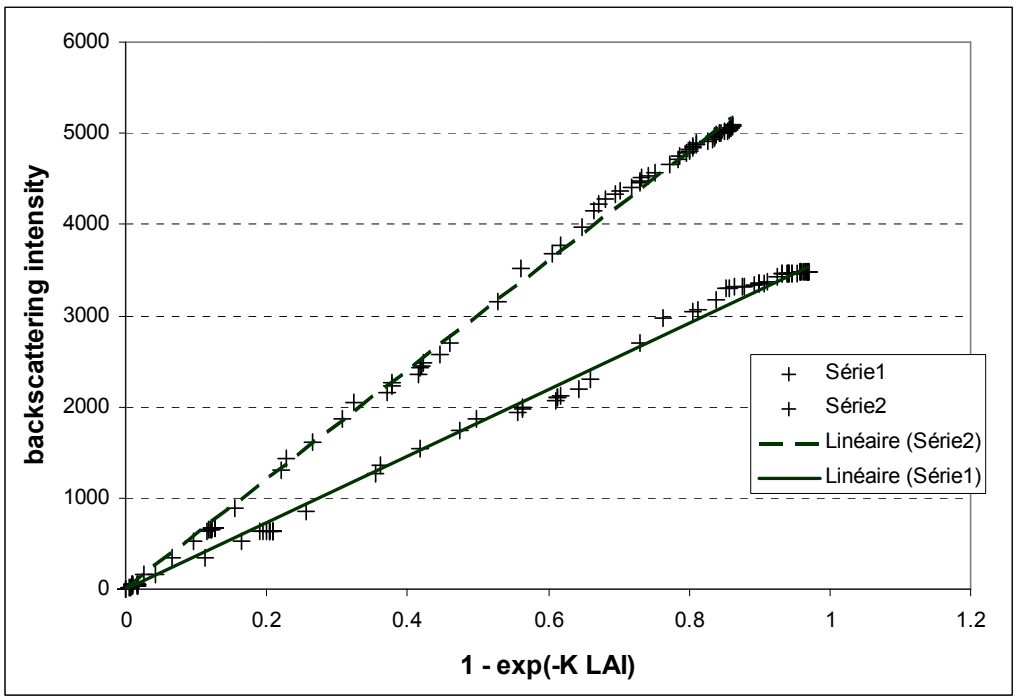


Figure 16 : *Relation entre le profil de LAI et le profil du signal rétrodiffusé, chaque point sur le graphe correspondant à une couche horizontale de végétation (1-exp[K LAI$_{couche}$] en abscisse) et l'intensité du signal qu'elle renvoie (en ordonnée). La série 1 représente la relation obtenue sans prendre en compte les rediffusions multiples et la série 2 la relation obtenue en prenant en compte la contribution des rediffusions multiples au signal (cas d'un lidar fonctionnant dans le proche infrarouge).*

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

4.3.3 Etude de l'impact de la taille d'empreinte sur l'estimation de la biomasse au moyen de simulations à partir des données expérimentales acquises avec le LAUVA

Cette étude vient en complément des simulations par lancer de rayons. Elle a fait l'objet d'une présentation sous forme de poster à l'EGU en mai 2011 [Bouvier et al., 2011]. La méthode et les résultats obtenus sont présentés dans ce qui suit.

Les simulations ont été réalisées par agrégation des formes d'ondes acquises par le prototype LAUVA sur les Landes. Les données du vol à 300 m d'altitude ont été utilisées avec par conséquent des taille d'empreinte au sol de 2.4 m de diamètre.

Les donnée de référence terrain sont constituées de relevés réalisés sur des placettes de 30 m x 30 m sur un peuplement adulte (3 placettes) et une jeune plantation (2 placettes). Sur le terrain la position des arbres, leur hauteur et le diamètre du tronc à 1,30 m (DBH) ont été mesurés.
La biomasse aérienne de chaque arbre a été estimée à l'aide d'une relation allométrique utilisant le DBH en entrée [Jenkins et al., 2003][10] reliant biomasse.

[10] Jenkins J.C. et al. (2003) National-scale biomass estimators for United States tree species, Forest Science, vol. 49, pp. 12-35

Puis, afin de pouvoir dériver la biomasse à partir des hauteurs d'arbre mesurées par le Lidar une relation Biomasse= f(Hauteur) a été établie à partir des données de référence terrain en utilisant un modèle de régression non linéaire (Figure 17).
Les formes d'onde Lidar ont ensuite été agrégées à différentes résolutions variant de 0.1 à 1 ha. La hauteur moyenne des arbres a ensuite été dérivée du signal comme étant la hauteur correspondant à 95% du cumul de l'énergie rétrodiffusée [Rosette et al.,2008][11].

La biomasse Lidar ABGempreinte a ensuite été estimée en utilisant la formule suivante :

ABGempreinte= f(Hlidar) * Densitéterrain * Surface

Avec :
- f(Hlidar) la biomasse d'un arbre moyen obtenue en appliquant la formule Biomasse=f(hauteur) à la hauteur moyenne dérivée du Lidar
- Denstiéterrain : la densité moyenne des arbres sur les parcelles étudiées
- Surface : la surface au sol de l'empreinte Lidar

Puis ont été analysées en fonction de la taille d'empreinte la variabilité intra-parcellaire des estimations de biomasse et l'écart au niveau parcellaire entre la biomasse dérivée du lidar et la biomasse dérivée des parcelles de référence.

L'évolution de la variabilité intra-parcellaire est illustrée sur la figure 18. Avec de petites tailles d'empreinte la biomasse est très hétérogène au sein d'une parcelle et l'impact des trouées locales est nettement visible (Cf. Figure 18 haut- peuplement adulte). Avec des empreintes de 1 Ha la biomasse apparaît relativement homogène au sein des différentes parcelles.

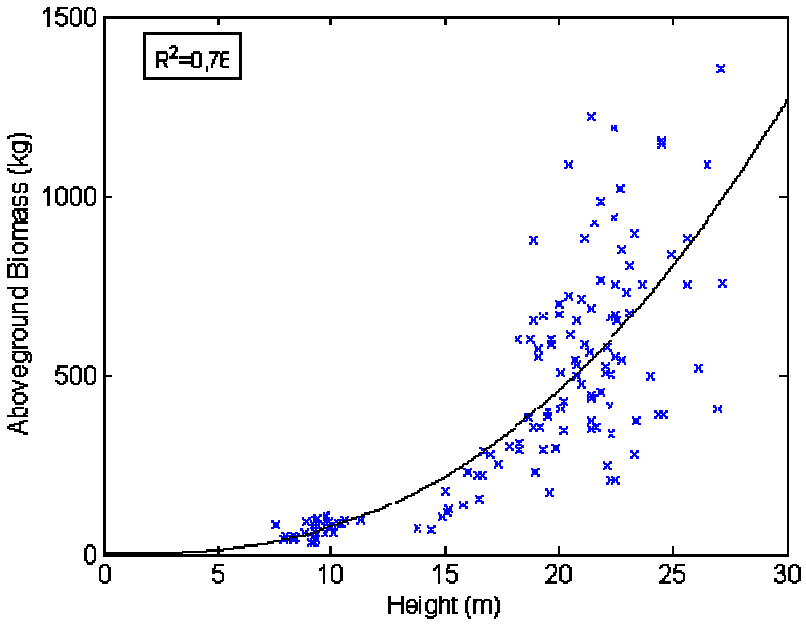


Figure 17 : *Relation reliant la biomasse à la hauteur établie sur la base des relevés terrain*

[11] Rosette J.A. et al. (2008) Satellite lidar estimation of stemwood volume; a methode using waveform decomposition, *PJF*, vol. 21, No. 1, pp. 76-85.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

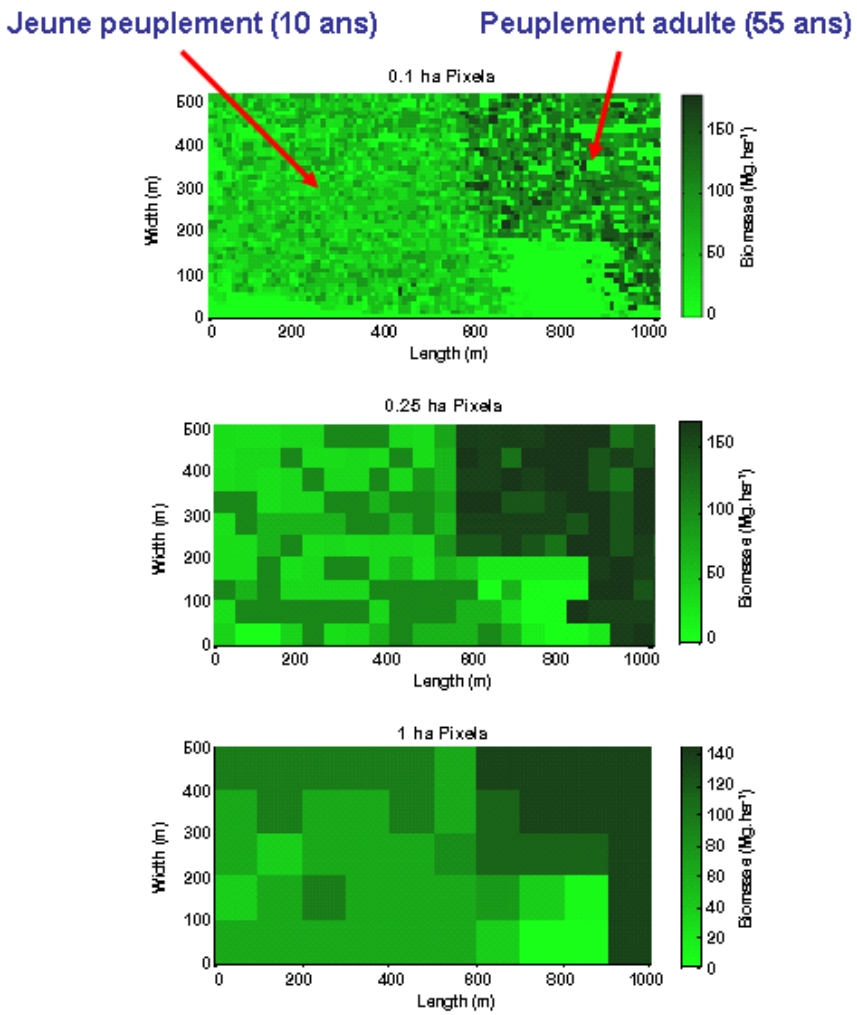


Figure 18 *: Variabilité intra-parcellaire de la biomasse aérienne dérivée du signal Lidar à 0.1 , 0.25 et 1 ha soit équivalent respectivement à des empreintes de diamètre 35, 54 et 112 m*

La figure 19 présente l'écart entre biomasse estimée à partir du Lidar et biomasse estimée à partir de relevés de terrain au niveau parcellaire. Les erreurs d'estimation sur ces peuplements de structure simple restent faibles ; elles restent comprises entre -10 et +10 %.

Pour la jeune plantation 89.1 $Mg.ha^{-1}$, cette valeur est sous-estimée pour les petites tailles d'empreinte puis surestimée à partir d'une empreinte de 0.3 ha (équivalent à ∅= 62 m).

Pour les peuplements adultes, la biomasse aérienne de référence est de 148.3 $Mg.ha^{-1}$ et est sous-estimée quelque soit la taille de l'empreinte au sol. Il est probable que l'estimation de la hauteur moyenne des arbres soit en partie à l'origine de ces erreurs.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

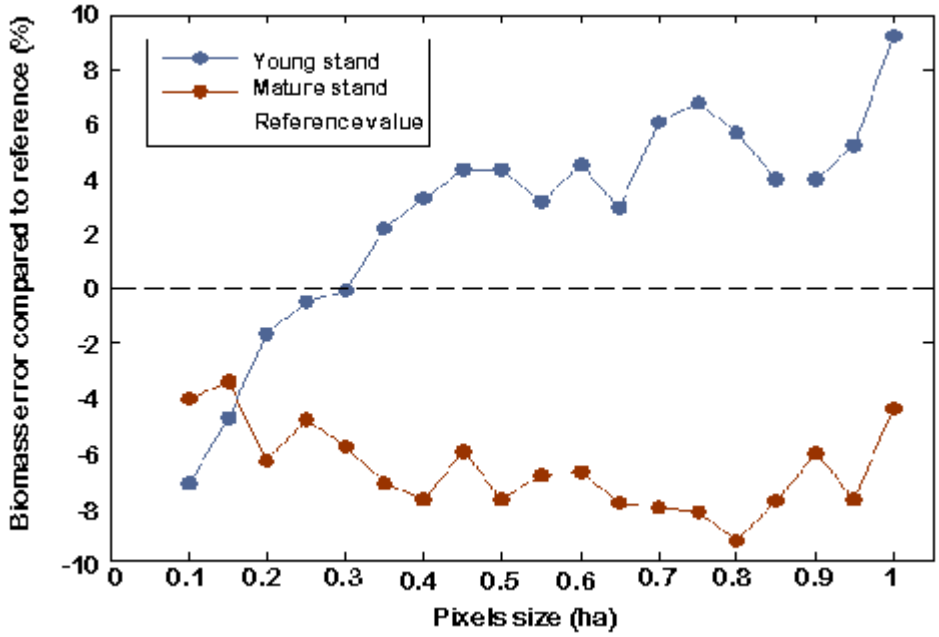


Figure 19 : *Erreur d'estimation de la biomasse aérienne moyenne au niveau parcellaire en fonction de la taille de l'empreinte au sol.*

Cette étude montre le potentiel d'un lidar à large empreinte dans l'UV pour estimer les biomasses forestières avec une bonne précision. Dans cette étude nous avons utilisé la densité des arbres dérivée des mesures de terrain. Par la suite, il apparaît donc important d'étudier soit la possibilité de dériver cette densité directement de données de télédétection (imagerie optique à THRS) soit la possibilité de dériver directement la biomasse du signal Lidar au niveau de la placette forestière, celui ci portant indirectement des informations sur la densité des peuplements. De plus, parvenir à définir, selon la taille d'empreinte du capteur, les stratégies d'échantillonnage du domaine forestier permettant d'avoir une caractérisation du milieu forestier adaptée aux besoins des forestiers (à l'échelle de la placette, de la parcelle ou du peuplement) et à l'étude de l'interface végétation/atmosphère est une étape clé pour le développement de capteur Lidar végétation ou de capteurs multifonction végétation/atmosphère.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

5 *BILAN DU PROJET :*

5.1 Avancées et Perspectives

La plupart des objectifs fixés pour cette étude ont été atteints.
Ainsi que souligné par le Comité Scientifique du PNTS, le fait que le prototype lidar n'était pas opérationnel au moment de la soumission du projet conduisait à un risque fort de ce projet. Cependant le CEA/LSCE a réalisé un important travail afin de rendre possible la réalisation des premières expérimentations sur de la végétation. Des données ont donc pu être acquises malgré le changement de prototype réalisé, qui a induit un changement de longueur d'onde par rapport à ce qui était prévu initialement (UV à la place du vert).

Les premières analyses ont permis de démontrer la capacité à extraire un certain nombre de paramètres forestiers (hauteur du couvert, structure horizontale, densité, biomasse) à partir des données acquises à

l'aide de ce prototype. Ainsi l'UV s'est révélé pouvoir apporter des informations similaires à ce que l'on obtient avec des lidar dans le PIR, tout au moins sur le type de peuplement assez simple étudié dans un premier temps.

Les adaptions qui ont été nécessaires pour étudier la végétation ont conduit à un Lidar dont les caractéristiques, en particulier en terme d'intensité émise, sont tellement différentes de ce qui est utilisé pour l'étude de l'atmosphère que la conception d'un lidar atmosphère/végétation basé sur le même émetteur/récepteur n'est pas concevable avec la même architecture instrumentale.

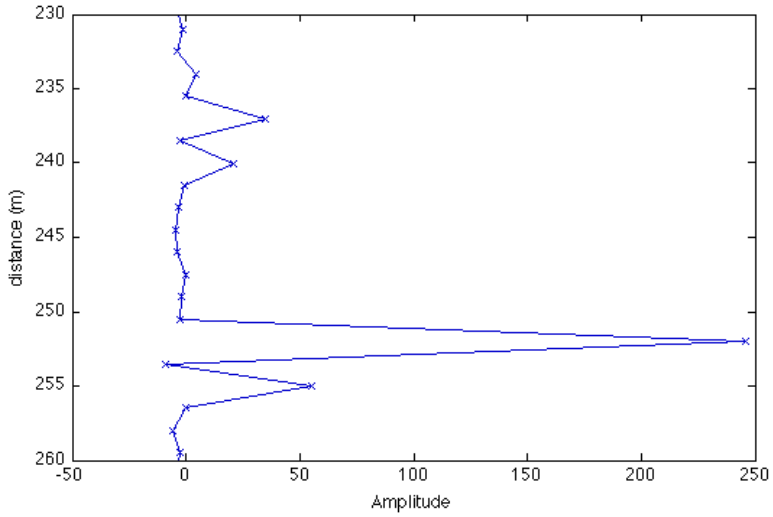
Cependant, cette étude a permis de progresser dans la connaissance du signal Lidar et dans le développement de méthodes de traitement de ce type de données. Elle a en particulier permis d'évaluer l'intérêt d'un Lidar de type profileur à taille d'empreinte intermédiaire, ce qui n'avait jamais été réalisé jusque là. Ce travail a donc contribué à apporter de nouveaux éléments qui pourront être mobilisés lors de la définition de nouveaux projets Lidar/végétation.

De plus, la limitation majeure du prototype utilisé étant sa résolution verticale, les résultats encourageants en termes de description de la végétation ont conduit le CEA/LSCE à développer un nouveau prototype avec un meilleur échantillonnage spatial, aussi bien vertical qu'horizontal. Pour construire ce deuxième instrument, des éléments spécifiques ont du être achetés (nouvelle carte d'acquisition) et des aménagements mécaniques réalisés. Ce travail d'adaptation a été fait hors du cadre de ce projet et du projet ExFOLIO. Le nouveau prototype a depuis déjà été testé en vol pour la première fois en Novembre 2010.). Les essais ayant été concluants (la figure 20 illustre le gain de qualité au niveau du signal qui résulte du changement de carte d'acquisition avec une meilleure résolution verticale), une première campagne d'acquisition de données a ensuite été réalisée sur une forêt de feuillus en 2011 (forêt de Barbeau près de Fontainebleau).

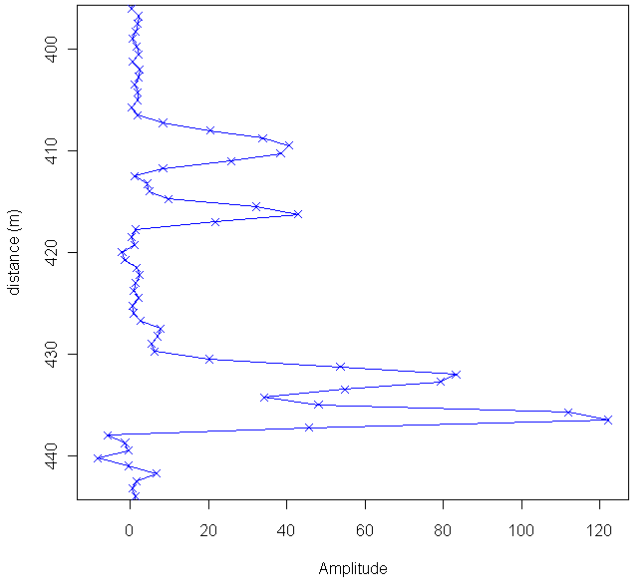
Le nouveau prototype est aujourd'hui à même de servir de base pour la réalisation d'expérimentations aéroportées nécessaires pour établir des références, en particulier en forêt tropicale, pour affiner la spécification de capteurs spatiaux capables de mesurer *a minima* la hauteur de la végétation dans des couverts très denses. Il devrait évoluer vers un système mixte forêt/atmosphère afin d'apporter les éléments de mesure nécessaires à la contrainte des flux de CO_2 d'interface.

Côté simulation le modèle développé a permis une première étude, avec une grande précision, de l'impact de certaines caractéristiques système et de la structure de la végétation sur le signal. Il est cependant nécessaire de poursuivre ces travaux sur plusieurs types de formations végétales pour analyser en particulier les relations entre le signal retour et le LAI. Une autre approche à développer par ailleurs consisterait à travailler sur des représentations simplifiée d'arbres dont la couronne est représentée par une forme géométrique. En effet cette approche est communément utilisée pour simuler la forme du retour d'onde mais sans prendre en compte les propriétés radiatives de l'intérieur des couronnes en termes de porosité (gap fractions) et de contribution de ses constituants (ex. bois et feuilles) au signal. L'utilisation de maquettes virtuelles réalistes permet à cet égard (i) de simuler précisément le signal des maquettes "détaillées", (ii) d'ajuster une forme géométrique pour représenter leur couronne et (iii) d'ajuster un modèle implicite de leur contenu (ne particulier leur porosité) de manière à obtenir un signal proche du signal théorique quand on utilise des représentations simplifiées d'arbres pour simuler le signal.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref



(a)



(b)

Figure 20 : *L'utilisation pour le dernier prototype LAUVA d'une carte d'acquisition haute fréquence permet une amélioration de la résolution verticale et donne accès à une meilleure description du signal retour.*
(a) *Exemple de signal enregistré au niveau d'un arbre avec la première version du prototype*
(b) *Exemple de signal enregistré au niveau d'un arbre avec la deuxième version du prototype*

Une partie des travaux menés dans le cadre des projets ExFOLIO et les travaux menés dans le cadre de ce projet PNTS ont contribué à développer les compétences dans le domaine du lidar appliqué à l'étude de la forêt au niveau national. Les avancées scientifiques et technologiques ont permis de soumettre, avec le soutien du groupe mission lidar du CNES et d'EADS, un projet de mission lidar spatiale, le projet LEAF (Lidar for Earth and Forests) en réponse à l'appel à idée EE8 de l'ESA. Une lettre d'intention pour un projet de mission lidar UV a aussi été soumise fin 2009 par le CEA/LSCE en réponse à un appel à proposition pour des expérimentations à bord de l'ISS.
Un autre aspect important de ce projet est qu'il a également permis de faire travailler ensemble des communautés scientifiques différentes. Il donne ainsi une capacité nouvelle de proposition pour l'étude des forêts et du bilan carbone.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

5.2 Production scientifique liée au projet

Publications :

- Cuesta J., P. Chazette, T. Allouis, J. Sanak, P. Genau, P. H. Flamant, S. Durrieu, and Cyrille Flamant. 2009. New airborne lidar observes forest canopies. SPIE Newsroom. DOI : 10.1117/2.1200909.1732
- Cuesta J., P. Chazette, T. Allouis, J. Sanak, P. Genau, P.H. Flamant, S. Durrieu et Flamant C. 2010. La canopée forestière vue par un lidar ultra-violet aéroporté de nouvelle génération. Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection, vol. 191, pp.19-27
- Cuesta, J., P. Chazette, T. Allouis, P.H. Flamant, S. Durrieu, J. Sanak, P. Genau, D. Guyon, D. Loustau and C. Flamant. 2010. Observing the forest canopy with a compact and polyvalent ultra-violet airborne lidar. Sensors, vol. 10, pp. 7386-7403, doi: 10.3390/s100807386
- Allouis, T.,Durrieu, S., Bailly, J., Chazette, P., Cuesta, J., Flamant, P. and Couteron, P., Potential of an ultraviolet, medium-footprint lidar prototype for retreiving tree heights and tree planting patterns , ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Accepted.

Conférences:

- Cuesta J., Chazette P. Allouis T., Sanak J., Genau P., Flamant P.H., Durrieu S., Toussaint F., 2009, La canopée forestière vue par un Lidar ultra-violet aéroporté de nouvelle génération, colloque SFPT Techniques Laser pour l'étude des environnements naturels et urbains, ESGT, Le Mans, 20- 21 janvier 2009
- Dauzat J., Stefas M., Chauve A., Caraglio Y., Durrieu S., 2009, Simulation de mesures Lidar par tracé de rayons sur des plantes virtuelles. , colloque SFPT Techniques Laser pour l'étude des environnements naturels et urbains, ESGT, Le Mans, 20- 21 janvier 2009
- Allouis, T. Durrieu, S. Cuesta, J. Chazette, P. Flamant, P. Couteron, P., 2010, Assessment of tree and crown heights of a maritime pine forest at plot level using a fullwaveform ultraviolet lidar prototype, International Geoscience and Remote Sensing Symposium
- Allouis, T., Durrieu, S., Cuesta, J., Chazette, P., Flamant, P.H., Couteron, P., 2010, Assessment of tree and crown heights of a maritime pine forest at plot level using a fullwaveform ultraviolet lidar prototype, Proceedings of the 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), art. no. 5651026, pp. 1382-1385.
- Cuesta J., P. Chazette, T. Allouis, P. H. Flamant, J. Sanak, P. Genau, S.Durrieu and C. Flamant, Observing the forest canopy with a new UV compact airborne lidar", 25nd International Laser Radar Confererence, St. Petersbourg, Russie, Juillet 2010.
- Bouvier M., Allouis T., Durrieu S. and Chazette P., 2011, Estimating forest biomass from medium and large footprint lidar data, European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2011, Vienna, Austria, 03-08 April 2011.
- Chazette, P., Soudani K, Royer P, Sanak J., Lardier M., Allouis A., Bouvier M., and Durrieu S., Forest canopy attributes derived from airborne lidar above the Barbeau/Fontainebleau forest, European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2011, Vienna, Austria, 03-08 April 2011.

Rapport de stage

Bouvier Marc, 2010, Etude de la canopée forestière par Lidar aéroporté, Master 2 de l'UVSQ (Université de Versailles St Quentin), LSCE, 29 pages.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref