



HAL
open science

La canopée forestière vue par un lidar ultra-violet aéroporté de nouvelle génération

Juan Cuesta, Patrick Chazette, T. Allouis, J. Sanak, Pascal Genau, Pierre H.
Flamant, Sylvie Durrieu, Cyrille Flamant

► **To cite this version:**

Juan Cuesta, Patrick Chazette, T. Allouis, J. Sanak, Pascal Genau, et al.. La canopée forestière vue par un lidar ultra-violet aéroporté de nouvelle génération. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 2010, 191, pp.19 - 27. hal-00581327

HAL Id: hal-00581327

<https://hal.science/hal-00581327>

Submitted on 30 Mar 2011

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.

LA CANOPEE FORESTIERE VUE PAR UN LIDAR ULTRA-VIOLET AEROPORTE DE NOUVELLE GENERATION

Cuesta J. (1,2), Chazette P. (1,3), Allouis T. (4), Sanak J. (1,3), Genau P. (2), Flamant P.H. (1), Durrieu S. (4),
et Flamant C. (2)

(1) Laboratoire de Météorologie Dynamique, Palaiseau, France
(2) Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales, Paris, France
(3) Laboratoire des Sciences du Climat et l'Environnement, Saclay, France
(4) UMR TETIS, Cemagref, Montpellier, France

Résumé

Un effort conjoint de l'Institut Pierre Simon Laplace (LMD, LSCE et LATMOS), du Cemagref et du Commissariat à l'Energie Atomique (CEA), a conduit à mettre en œuvre le nouveau prototype Lidar Atmosphérique UltraViolet Aéroporté (LAUV(A)) afin d'étudier la répartition verticale de la canopée forestière dans la région des Landes, aux abords du bassin d'Arcachon et de Mimizan. Ce lidar compact et polyvalent embarqué sur ULM permet d'effectuer des mesures avec une maniabilité inégalée, de disposer d'une grande capacité d'adaptation des paramètres instrumentaux (divergence, champ de vue, énergie émise, résolutions verticale et horizontale, angle de visée) et d'effectuer des plans de vol complexes. L'utilisation d'une longueur d'onde dans l'ultra-violet, à 355 nm, permet l'émission d'impulsions énergétiques (16 mJ à 20 Hz) tout en conservant la sécurité oculaire. Les principaux résultats de cette première expérience sont orientés vers une caractérisation statistique des structures verticales (hauteur et distribution verticale de la canopée et sous-bois) des parcelles arborées. Trois parcelles d'environ 500 x 500 m², composées principalement de pins maritimes de plusieurs âges, ont été échantillonnées suivant différentes configurations expérimentales. Les résultats obtenus constituent des travaux amont nécessaires à la préparation de futures missions lidar spatiales dédiées à l'étude des canopées forestières à l'échelle globale.

Mots Clés : télédétection de la végétation, canopée, lidar, aéroporté, ultra-violet, avion ultra-léger-motorisé

Abstract

A French effort of the Institut Pierre Simon Laplace (LMD, LSCE and LATMOS), the Cemagref and the Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) has led to the deployment of a new airborne lidar prototype (LAUV(A), Lidar Atmosphérique UltraViolet Aéroporté) to study the vertical distribution of the forest canopy in the Landes region in the southwest of France, around the Arcachon basin and Mimizan. This compact and polyvalent lidar onboard an ULA is capable of measuring the forest canopy with an unequalled malleability, both in terms of adaptability of instrumental parameters (divergence, field of view, sensitivity, pointing angle) and flight plan (measuring range and field exploration). The use of an ultra-violet wavelength at 355 nm enables eye-safe emission of energetic laser pulses (16 mJ at 20 Hz). During this experience, the vegetation vertical structure (canopy height and vertical distribution, bushes and sub-wood) of tree parcels was statistically characterized. Three parcels of approximately 500 x 500 m² composed principally by maritime pines of several ages were sampled following different experimental configurations. These new results contribute, as a first step, to the preparation of future lidar spaceborne missions dedicated to the forest canopy studies at the global scale.

Keywords : Vegetation remote sensing, laser, airborne lidar, ultra-violet, ultra-light airplane

1. Introduction

Le couvert forestier est un facteur essentiel dans la régulation du climat. C'est l'un des principaux puits du CO₂ atmosphérique, et c'est également l'un des éléments majeurs de régulation du cycle de l'eau. Les forêts et les espaces verts dans et autour des agglomérations urbaines jouent un rôle important sur la qualité de l'air grâce à leur capacité de filtrage des polluants gazeux et particulaires. A contrario, les échanges entre la végétation et l'atmosphère ont une influence significative sur l'équilibre chimique

atmosphérique qui peut aussi modifier la production des polluants secondaires comme l'ozone via l'émission de composés organiques volatiles ou d'oxydes d'azote. Par ailleurs, le changement climatique prévu pour les décennies à venir devrait engendrer des périodes de sécheresse plus fréquentes. Il pourrait ainsi engendrer de plus nombreux départs de feux dans les écosystèmes forestiers déjà très sensibilisés, comme ceux du bassin méditerranéen. Pour mieux comprendre et prévenir les risques liés aux incendies de forêt, il est indispensable de bien connaître les paramètres structuraux de la canopée

forestière. La caractérisation de la canopée est aussi essentielle pour la gestion et l'utilisation durable des ressources forestières, notamment pour le recensement des espèces d'arbres et le suivi de leur croissance. Elle est une aide aux suivis de l'évolution de la biodiversité, des techniques de culture et de l'impact des facteurs météorologiques (régimes de pluie, tempêtes, etc).

Ces nombreux enjeux environnementaux et socio-économiques motivent le développement de nouveaux instruments de télédétection et de nouvelles méthodologies de mesure.

La télédétection active par lidar a ici un rôle fondamental à jouer. Elle donne en effet des informations sur la structure 3D des peuplements forestiers [ST-ONGE, 2005 ; DURRIEU, 2007], depuis le sol jusqu'au sommet des arbres, informations qui ne sont pas accessibles avec les capteurs optiques ou radar actuels. D'autre part le lidar ayant déjà fait ses preuves pour la mesure de certaines propriétés de l'atmosphère [e.g. FLAMANT 2005], il est possible d'envisager le développement de capteurs visant à caractériser conjointement l'atmosphère et la végétation, afin de mieux comprendre les interactions entre ces deux milieux. De tels développements instrumentaux, avec comme objectif final la définition d'une mission spatiale dédiée à l'étude de la surface et de ses interactions avec la basse atmosphère à l'échelle globale, doivent s'appuyer sur (1) l'évaluation des produits issus des missions spatiales existantes, par exemple ICESat [ZWALLY ET AL., 2002] ou CALIPSO [WINKER ET AL., 2003] et (2) l'évaluation de prototypes lidar sol et aéroportés.

Pour préfigurer de tels systèmes spatiaux la taille de l'empreinte laser au sol devra être de taille moyenne à large (d'un mètre à plusieurs dizaines de mètres). Le choix de la longueur d'onde demandera un compromis entre plusieurs applications. La longueur d'onde de 355 nm est déjà utilisée pour les programmes spatiaux visant à étudier l'atmosphère tels que ADM-Aeolus (<http://www.esa.int/esaLP/LPadmaeolus.html>) et EarthCare (<http://www.esa.int/esaLP/LPearthcare.html>), coordonnés par l'Agence Spatiale Européenne (ESA). Cette longueur d'onde permet de plus de respecter la sécurité oculaire (pertinent pour les systèmes aéroportés) même avec des impulsions plus énergétiques que celles utilisées par des systèmes lidar proche infrarouge ou vert. L'objectif principal de cette étude est de démontrer son intérêt pour l'étude de la canopée forestière.

Dans ce cadre, un effort conjoint de l'Institut Pierre Simon Laplace (Laboratoire de Météorologie Dynamique, Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement et LATMOS), du Cemagref et du Commissariat à l'Energie Atomique a conduit à mettre en œuvre le nouveau prototype lidar atmosphérique aéroporté (LAUV(A), [CHAZETTE ET AL., 2007]) afin

d'étudier la répartition verticale de la canopée forestière dans la région des Landes aux abords du bassin d'Arcachon et de Mimizan. Ce travail a été effectué grâce au soutien du centre National d'Etude Spatiale (CNES) car le système lidar utilisé possède des caractéristiques proches de celles des futurs lidars spatiaux de l'ESA. Le nouveau prototype lidar et les instruments associés pendant l'expérience sont présentés dans la section 2. Les caractéristiques des forêts observées et les méthodes d'analyse sont exposées dans les sections 3 et 4. La section 5 illustre les premiers résultats de l'expérience, orientés vers la caractérisation statistique de parcelles arborées à partir de la structure verticale de leur couvert (hauteur d'arbres, houppiers et sous-bois). Les conclusions et perspectives sont données dans la section 6.

2. Instrumentation aéroportée

Le système lidar ultra-violet LAUV(A) a été embarqué sur un ULM (Ultra-Léger Motorisé, voir la Figure 1). Ce lidar aéroporté compact et polyvalent permet d'effectuer des mesures avec une maniabilité inégalée. La stratégie expérimentale adoptée permet ainsi une grande adaptabilité du système de mesure lidar (divergence, champ de vue, énergie émise et résolution verticale) et de l'échantillonnage grâce à l'ULM (plans de vol complexes, angle de visée variable, résolution horizontale et taille de l'empreinte selon la vitesse et la hauteur de vol). Ce prototype lidar est à retour d'onde complète (ROC). Il est destiné à la recherche et à l'évaluation des futurs systèmes embarqués sur satellite. Utilisé originalement pour des applications atmosphériques, il a été conçu et développé par le CEA (Commissariat à l'Energie Atomique) et le CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique). Il a été déployé avec succès en Afrique de l'Ouest dans le cadre de la campagne internationale AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine [CHAZETTE ET AL., 2007]). Dans le cadre du présent travail, la sensibilité et la vitesse d'acquisition du lidar LAUV(A) ont été spécifiquement adaptées pour la mesure de la hauteur de la canopée (indiquant les sommets et bases des couronnes des arbres) ainsi que son profil vertical (fonction de la densité de feuilles, du bois et leur réflectivité à la longueur d'onde de mesure). Les caractéristiques techniques du LAUVA sont présentées dans le Tableau 1. Le système est constitué par un laser Nd :YAG triplé émettant à 355 nm. L'utilisation d'une longueur d'onde dans l'ultra-violet à 355 nm permet l'émission d'impulsions énergétiques (16 mJ à 20 Hz) tout en conservant la sécurité oculaire. Des informations additionnelles sur l'instrument sont disponibles sur le site web de l'entreprise qui le commercialise avec la licence EZLidar (<http://www.leosphere.com>). Le lidar utilisé ici est le prototype initial. Il est de plus petite taille et ne dispose que d'une voie de détection du rayonnement rétrodiffusé total.

Le porteur du LAUV(A) est un ULM construit par l'entreprise Air Création (<http://www.aircreation.fr>). Très manœuvrable et performant, cet ULM Tanarg 912-S (voir Tableau 1) nécessite uniquement une piste de l'ordre de 200 m de long pour le décollage et l'atterrissage. La charge maximale est de 250 kg (incluant le pilote) et la durée de vol (de 3 à 4 heures) dépend des conditions de vol. Les vols scientifiques ont été effectués à une vitesse de croisière de 60-70 km/h (~20 m/s) et une hauteur entre 300 et 500 m.

Les observations de la canopée de forêt landaise ont été effectuées avec une large empreinte laser au sol (2,4 m et 4 m de diamètre pour 300 et 500 m d'altitude de vol, respectivement). Cette taille d'empreinte permet d'échantillonner une grande partie d'un arbre avec un seul tir laser, améliorant ainsi la représentativité et l'isotropie de la mesure. L'utilisation d'une longueur d'onde dans l'ultra-violet se traduit par une réflectivité de la végétation plus faible par rapport aux systèmes opérant dans l'infrarouge. Ceci permet de réduire l'ambiguïté sur la durée du retour lidar créée par la diffusion multiple [DAUZAT ET AL., 2009]. La haute énergie émise pour chaque impulsion (16 mJ) et la large empreinte confèrent une bonne sensibilité au système lidar qui peut référencer le sol dans la plupart des échos laser (voir la section 4). Le pas d'échantillonnage vertical de ce premier système est de 1,5 m sur la ligne de visée du lidar et une distance horizontale entre tirs de ~1,5 m. Cette configuration vise à caractériser les parcelles d'arbres de manière statistique et non à les décrire de manière exhaustive arbre par arbre. En effet, les traces au sol des mesures sont espacées et l'empreinte laser peut ne pas échantillonner tous les sommets des arbres. Les observations ont été effectuées à plusieurs angles de visée (nadir et 20°) grâce au montage du lidar sur un axe de rotation transverse à la direction de déplacement de l'ULM.

La charge utile scientifique a été complétée par deux caméras à trois bandes (opérant dans le spectre visible, proche infrarouge ou ultraviolet selon les filtres utilisés). A partir des images aériennes successives, la structure tridimensionnelle de la canopée sera restituée par stéréoscopie et comparée à celle obtenue par le lidar. Le géoréférencement des observations a été effectué à l'aide d'un système différentiel GPS (Global Positioning System) et un horizon artificiel pour déterminer les trois angles de la direction de visée durant les vols [CHAZETTE ET AL., 2007]. L'alimentation électrique des instruments a été assurée par des batteries avec une autonomie de l'ordre de 2 heures.

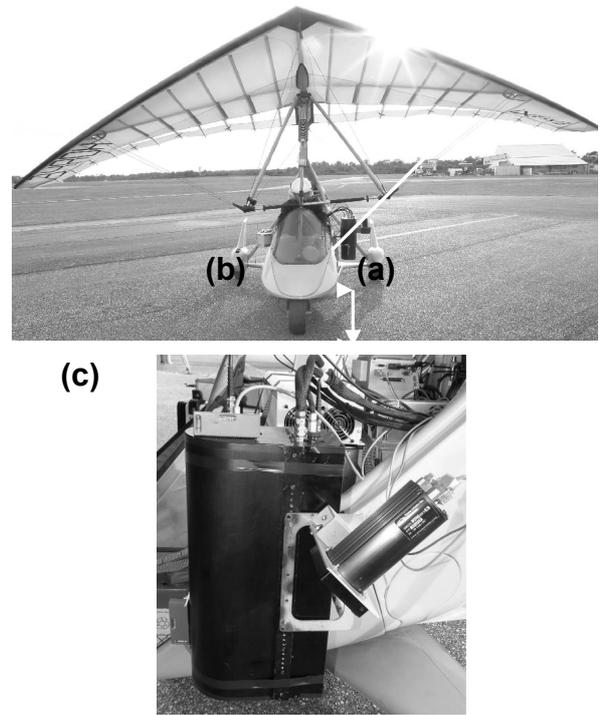


Figure 1 : ULM embarquant (a) le Lidar ultra-violet de nouvelle génération et (b) les caméras trois bandes. (c) Grossissement de la tête optique du système Lidar.

Lidar	Longueur d'onde : 355 nm
	Energie par impulsion : 16 mJ (sécurité oculaire)
	Durée de l'impulsion : 5 ns
	Cadence de répétition : 20 Hz (1,5 m entre tirs)
	Résolution verticale : 1,5 m
	Divergence : 4 mrad (4 m d'empreinte à 500 m)
	Champ de vue : 5 mrad
	Détecteur : photomultiplicateur / analogique
	Dimension de la tête optique : 45 x 28 x 18 cm
Poids : ~9 kg (tête) + ~20 kg (électronique)	
Alimentation électrique : batteries (<500 W)	
Géoréféré n-cement	GPS différentiel : Leica GX1220
	Hoziron artificiel : DYNON Avionics
ULM	Charge utile scientifique maximale : 120 kg
	Vitesse de vol : 17 à 40 m/s (60 à 145 km/h)
	Endurance: 4 h à 20 m/s (3 h à 40 m/s)
	Hauteur de vol: 200 m à 5,8 km

Tableau 1 : Caractéristiques du Lidar LAUV(A) embarqué sur un ULM

3. Première expérience de mesure : La forêt des Landes

En septembre 2008, le nouveau système décrit ci-dessus a été utilisé pour mesurer la hauteur et profil vertical de la canopée forestière dans la forêt des Landes, au sud-ouest de la France. Cette région possède une surface boisée proche d'un million d'hectares, principalement occupée par des plantations de pins maritimes (90%, voir l'exemple dans la Figure 2a). A leur maturité, ces conifères atteignent une hauteur maximale d'environ 25 m [GUYON ET AL., 2003]. Ils sont constitués par un tronc nu et un houppier d'une dizaine de mètres de hauteur chacun. Le houppier est composé de branches et d'aiguilles. Selon l'entretien des parcelles d'arbres, elles contiennent des arbustes et du sous-bois plus ou moins dense. Le relief de la région est très faible, minimisant ainsi les incertitudes liées à la détermination de la localisation du sol.

Durant l'expérience de mesure, trois parcelles d'environ 500 x 1000 m² avec des pins maritimes de plusieurs âges ont été échantillonnées. Les premières mesures ont été effectuées au Bray (à 10 km de Bordeaux) sur une parcelle de pins âgés d'environ 55 ans et d'une hauteur comprise entre 20 et 25 m (voir la Figure 2b). L'Institut national de la recherche agronomique (INRA) effectue annuellement sur cette parcelle des mesures dendrométriques standards (hauteur des arbres, des houppiers, diamètre des troncs). A partir d'une tour de 40 m de hauteur située au centre de la parcelle, des mesures continues de flux turbulents, CO₂ et rayonnement solaire sont effectuées. Des travaux futurs d'inter-comparaison de ces observations avec celles obtenues par le lidar aéroporté sont prévus. Les deux autres parcelles échantillonnées (Figures 2c et 2d) se localisent près de la ville de Mimizan, à 60 km au sud du bassin d'Arcachon. La parcelle de Mimizan 1 (Figure 2c) est constituée dans sa partie est par des pins semi-naturels de 50 ans et de 20-22 m de hauteur. Dans sa partie ouest les pins sont plus jeunes, ils ont environ 35 ans et sont d'une hauteur moyenne de 23 m. Les derniers 200 m à l'ouest de la parcelle sont plantés en pins âgés de 19 ans, d'une hauteur allant de 10 à 12 m. Dans l'ensemble de cette parcelle, le sous-bois est particulièrement dense et haut (~2 m) et il est constitué par des fougères. La troisième parcelle (Mimizan 2 dans la Figure 2d) est constituée de plantations plus ou moins âgées : la moitié sud-est correspond à des pins de 55 ans d'environ 20 m de hauteur et la moitié nord-ouest à des arbres jeunes, de 10 ans d'âge, d'environ 10 m de hauteur. Au centre-sud, les arbres d'un secteur

d'environ 100 x 100 m ont été coupés, laissant le sol à nu.

La parcelle de Bray a été échantillonnée selon un plan de vol en quadrillage (voir la Figure 3a), avec une altitude constante et une direction de visée du lidar fixe par rapport à l'ULM pour chaque vol. Des observations ont été effectuées à deux hauteurs de vol, 300 et 500 m. Elles donnent respectivement une empreinte lidar au sol de 2,4 et 4 m de diamètre. Des mesures en visée nadir et à 20° ont également été effectuées et inter-comparées aux précédentes (voir section 5). Les plans de vol au dessus des parcelles Mimizan 1 et 2 ont été effectués de manière longitudinale, à 300 m de hauteur et en visée au nadir (voir Figure 3b et 3c).

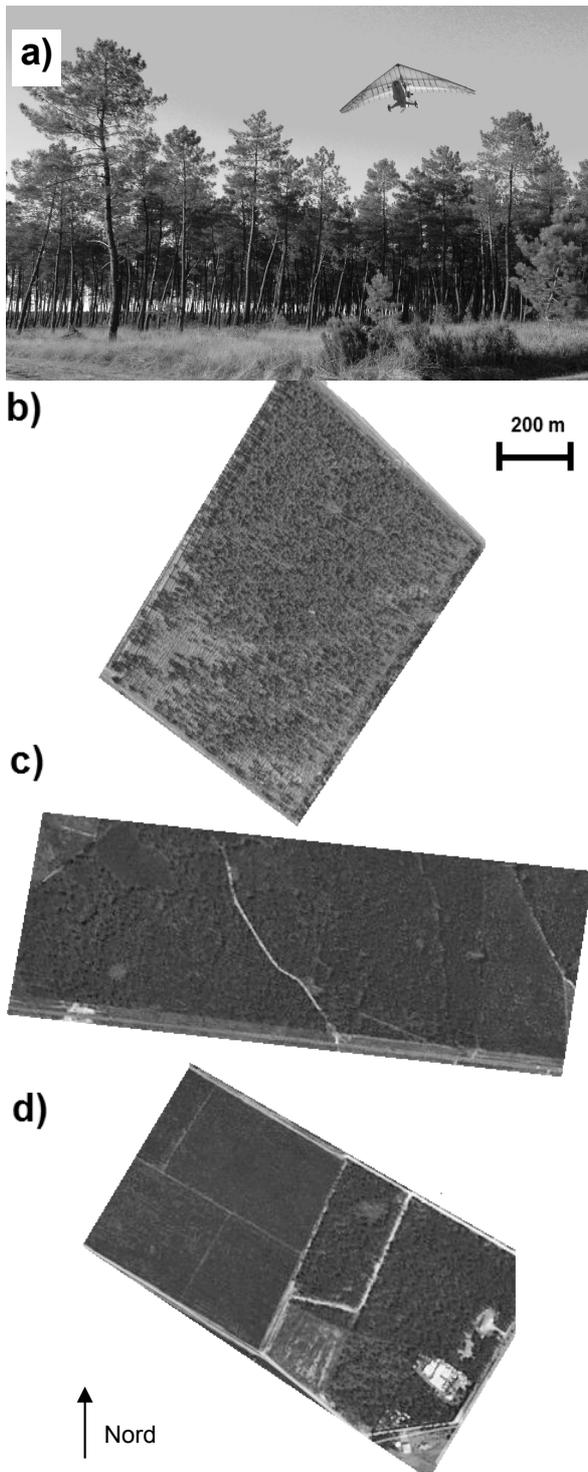


Figure 2 : (a) Aperçu des parcelles observées. Vues aériennes de la parcelle de Bray (b), de la Parcelle Mimizan 1 (c) et de la Parcelle Mimizan 2 (d).

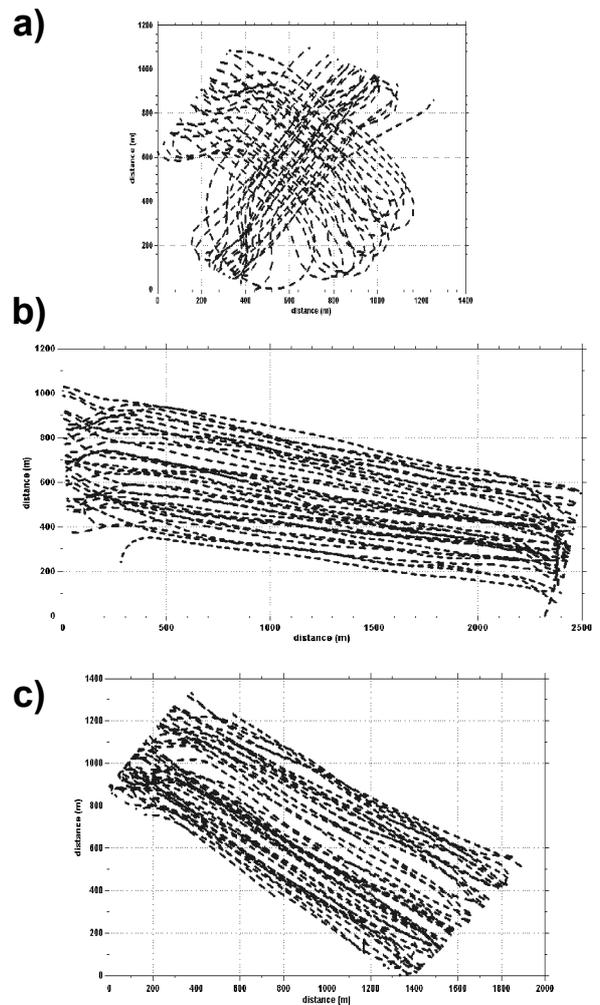


Figure 3 : Echantillonnage des parcelles avec le lidar embarqué sur l'ULM : parcelle de Bray (a), parcelle Mimizan 1 (b) et parcelle Mimizan 2 (c).

4. Analyse des retours d'onde complète

L'analyse des signaux lidar consiste d'abord à déterminer précisément l'altitude du sol, pour ensuite situer la structure de canopée mesurée par rapport à cette référence. Le système LAUV(A) est un lidar à retour d'onde complète qui effectue l'acquisition de manière résolue selon la verticale avec un pas d'échantillonnage en altitude initialement de 1,5 m (il sera réduit pour les prochaines expériences). En effet, la résolution verticale de la détection de la distance entre la surface supérieure de la canopée et le sol est uniquement influencée par le pas d'échantillonnage et la vitesse de réponse du système de détection. Ces deux transitions abruptes du signal lidar sont affectées de la même manière par l'élargissement du retour produit par la durée non négligeable de l'impulsion. Une méthode classique de détection de discontinuités dans l'écho lidar a été utilisée. Cette méthode est souvent mise en œuvre pour la détermination des structures des

couches nuageuses dans l'atmosphère [BERTHIER ET AL., 2008]. D'abord, un seuil de détection est fixé en fonction du niveau de bruit de chaque profil. Il est calculé comme l'écart-type du signal numérisé une centaine de mètres après l'écho du sol (identifié par son intensité et l'altitude de vol obtenue par GPS). L'écho de sol est donc détecté pour chaque profil comme le retour le plus lointain du lidar qui dépasse le seuil de détection.

Selon le type de sol, des échos plus au moins longs ont été observés (Figure 4). Pour le sol nu, l'écho lidar est aussi court que la résolution verticale de l'instrument (~1,5 m) et il est de l'ordre de grandeur de l'étendue verticale de l'impulsion laser (~1,5 m). En cas de végétation basse le retour s'élargit et nous considérons que le sol se situe au niveau du point d'intensité maximale du retour lidar. Quand la structure des arbres est échantillonnée, l'écho des couronnes est clairement identifié au-dessus de l'écho de sol plus au moins large selon la hauteur du sous-bois. Dans ce cas, l'écho de sol est susceptible d'être atténué à cause de l'obstruction partielle de l'impulsion laser qui traverse la couronne. Dans le présent travail, nous avons étudié la capacité à restituer à partir du signal lidar certaines caractéristiques morphologiques de la végétation : la position des surfaces supérieure et inférieure de la canopée, la zone de densité de végétation maximale de la canopée (echo maximum dans la canopée) et la hauteur du sous-bois (Figure 4). Nous n'avons pas corrigé les profils verticaux de l'effet d'atténuation évoqué précédemment, étape qui reste nécessaire pour restituer le profil de végétation (voir LEFSKY ET AL., 1999, 2002).

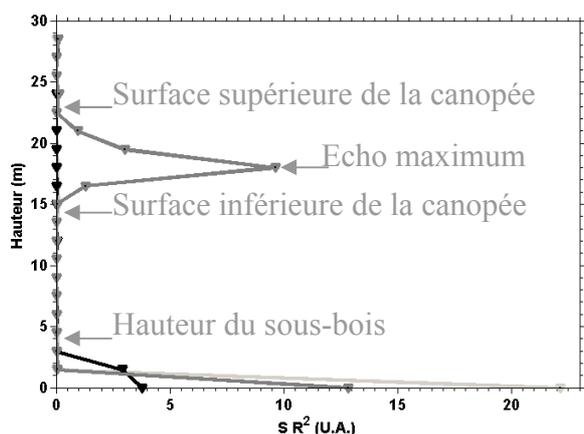


Figure 4 : Types d'échos lidar mesurés : sol nu (gris clair), sol avec végétation basse (noir) et pin maritime et l'écho de sol en dessous (gris foncé). L'intensité de l'écho lidar correspond au signal lidar numérisé, après la soustraction du signal de fond de ciel et la multiplication par la distance de l'émetteur à la cible au carré. Les paramètres structuraux qui seront analysés dans les sections suivantes sont indiqués en gris avec une flèche.

La largeur de l'empreinte résultant de la configuration expérimentale du couple LAUV(A)/ULM, permet d'observer un écho de sol dans la plupart des signaux retour malgré l'atténuation du signal par la végétation. L'exemple de la Figure 5a montre un transect de profils lidar. La distance entre le lidar et l'écho du sol suit une variation progressive profil après profil, ce qui est en lien avec le déplacement vertical de l'ULM et les variations de la hauteur du terrain. Suite à la détection du sol sur chaque profil, une vérification de la variation progressive des échos détectés est effectuée. Dans le cas d'une détection erronée, l'écho de sol est estimé par interpolation de la position entre les profils voisins. Les résultats de cette méthode sont indiqués par la ligne rouge sur la figure 5a.

Une fois le sol détecté, les distances mesurées par le lidar sont projetées sur la verticale en utilisant les trois angles mesurés par la centrale inertielle (tangage, roulis et cap magnétique), qui est solidaire du lidar. La Figure 5b montre le transect lidar par rapport au sol corrigé des effets angulaires. Nous y observons la présence récurrente du sous-bois, la structure bien cohérente des couronnes des pins et l'absence de retour du signal lidar par les troncs nus.

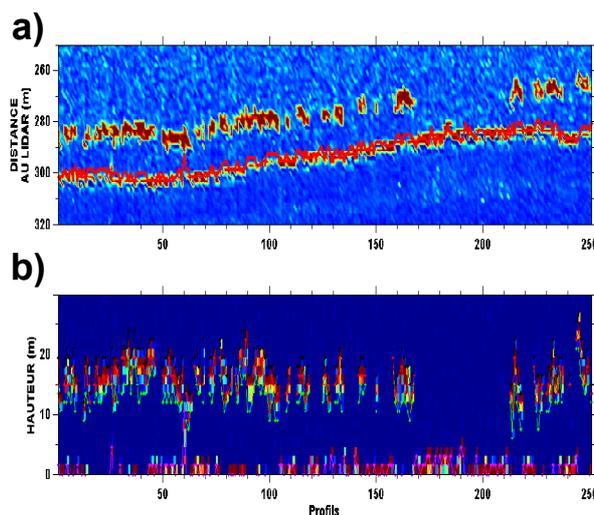


Figure 5 : Exemple de transect de profils de mesure pour la parcelle Mimizan 2 : par rapport à la distance au lidar avec l'écho de sol détecté pour chaque profil (ligne rouge) (a), et référencié par rapport au sol et corrigé des effets angulaires (b).

Le positionnement de chaque empreinte lidar dans les parcelles au niveau du sol a donc été reconstruit en utilisant les mesures du GPS différentiel et de l'horizon artificiel. Nous avons conduit nos travaux sur l'analyse de la répartition statistique des structures verticales des profils forestiers à partir de ces données géoréférencées.

5. Résultats

A partir des profils lidar mesurés dans le couvert forestier, nous allons décrire chacune des trois parcelles par les distributions statistiques de la hauteur des arbres, des épaisseurs des couronnes associées et de la hauteur du sous-bois.

5.1. Structure 3D des parcelles

Pour les arbres de la parcelle de Bray, les observations lidar montrent une hauteur de la surface supérieure de la canopée assez homogène (Figure 6a). Ceci est cohérent pour cette plantation constituée de pins de 55 ans d'âge, montrant de même la cohérence et la reproductibilité des résultats avec la méthodologie instrumentale et algorithmique utilisée. La hauteur moyenne de la canopée est de l'ordre de 19 m avec des arbres légèrement plus hauts (22-23 m) au centre de la parcelle. Le maximum du retour lidar se trouve approximativement à 3 m en dessous de la surface supérieure et à environ 5 m de la surface inférieure de la canopée. L'aspect visuel des pins (voir Figure 2a) confirme cette disposition verticale des couronnes bien identifiables par la densité des branches et des aiguilles. Le sous-bois est assez peu dense et il se concentre généralement dans le premier mètre au-dessus du sol.

La parcelle de Mimizan 1 montre une répartition plus hétérogène, avec des secteurs d'arbres de différentes altitudes (voir Figure 7a). La hauteur des arbres dans chacune des zones est cohérente avec ce que l'on peut attendre en connaissant leurs classes d'âge respectives. La partie la plus haute située à ~25 m (localisée sur la Figure 7a à ~1200 m selon l'abscisse et ~900 m selon l'ordonnée) correspond au secteur où la croissance est la plus efficace. Au sud, les arbres sont plus bas avec des hauteurs de canopée ~18 m. Le secteur des arbres plus jeunes (à l'est, à une abscisse ~2000 m) est associé à une hauteur moyenne de canopée plus faible de ~12 m. La répartition de la surface inférieure de la canopée (Figure 7c) et d'écho maximum dans la couronnes (Figure 7b) suit bien la répartition de la surface supérieure de la canopée (Figure 7a). Le sous-bois détecté est légèrement plus haut pour le secteur des arbres jeunes (Figure 7d) et proche de la surface inférieure de la canopée.

Les paramètres structuraux du couvert forestier pour la parcelle de Mimizan 2 (Figure 8) apparaissent cohérents par rapport au niveau de développement des arbres. Ils sont par ailleurs en très bon accord avec les mesures effectuées sur le terrain. A l'est de la parcelle, à l'abscisse 1000 m, les arbres ont une cinquantaine d'années avec une hauteur moyenne de canopée de l'ordre de 18 m. A l'ouest, vers l'abscisse 1000 m, les arbres sont plus jeunes (~10 ans) et ils sont associés à une hauteur moyenne de canopée de l'ordre de 10 m.

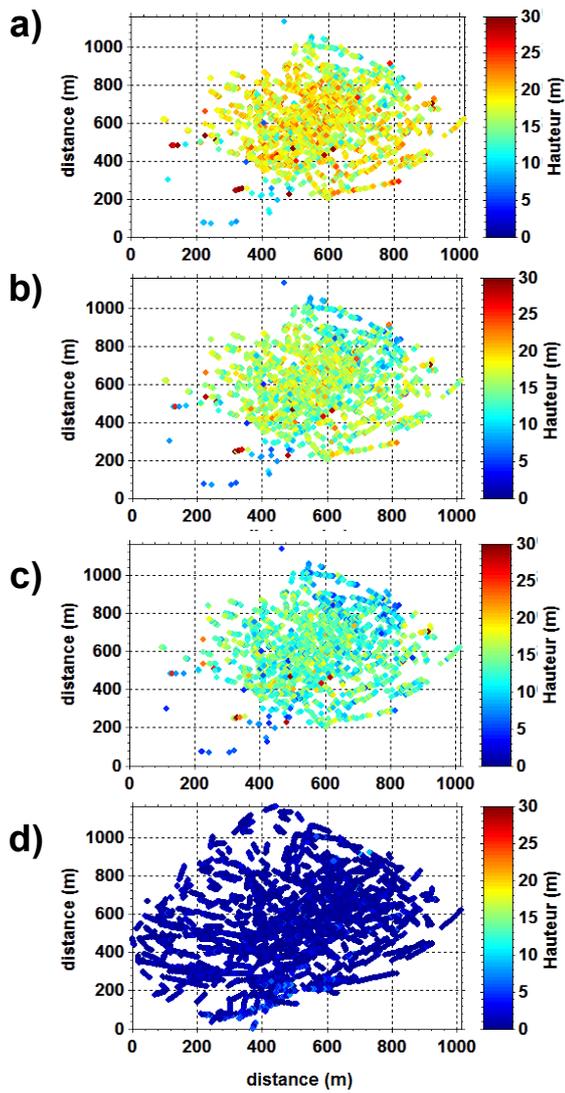


Figure 6 : Hauteurs de la canopée sous la trace du lidar à partir des observations de la parcelle de Bray (visée lidar nadir à une altitude de 300 m par rapport au sol) : **(a)** surface supérieure de la canopée, **(b)** échos maximum (hors sol), **(c)** surface inférieure de la canopée et **(d)** hauteur du sous-bois.

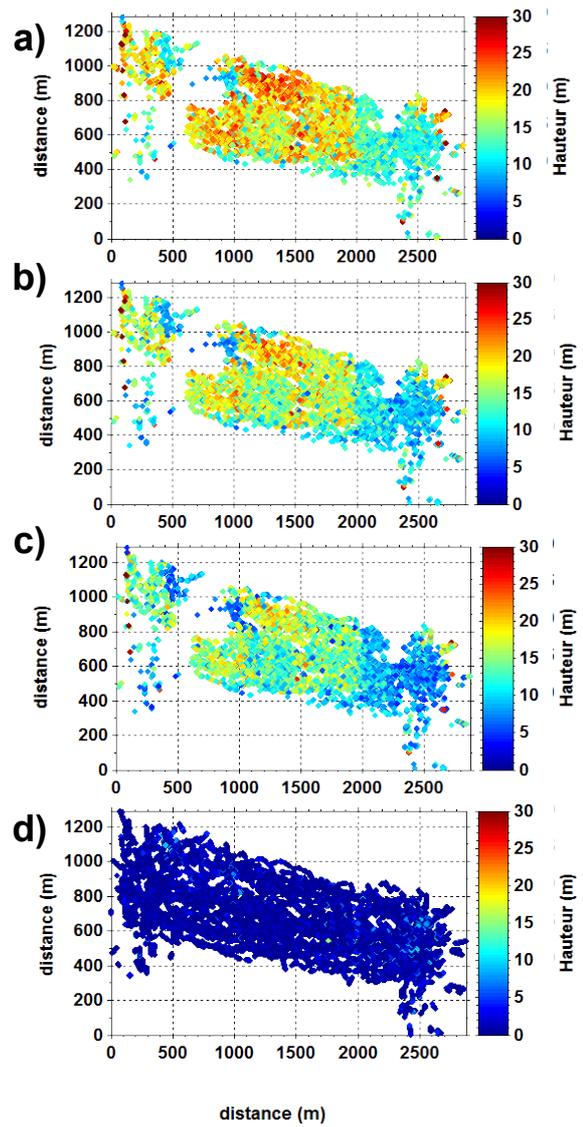


Figure 7 : Idem que pour la Figure 6 dans le cas de la parcelle de Mimizan 1.

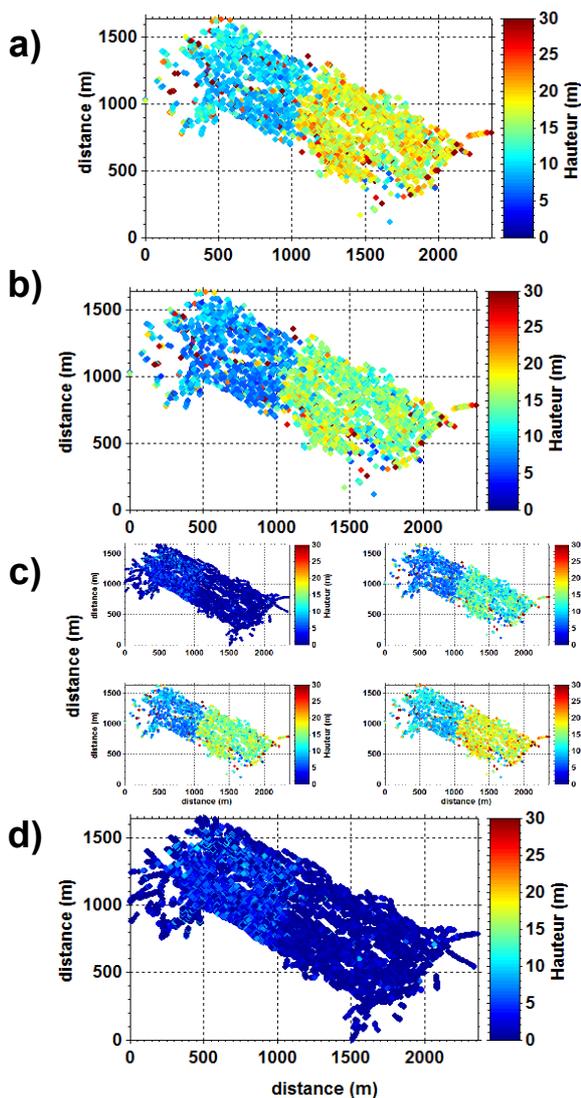


Figure 8 : Idem que pour la Figure 6 dans le cas de la parcelle de Mimizan 2.

5.2. Répartition moyenne de la canopée

Pour décrire de manière synthétique la répartition verticale de la canopée d'une parcelle, nous avons calculé le profil lidar moyen des arbres échantillonnés ainsi que la densité de probabilité cumulée des hauteurs détectées (voir la Figure 9 pour la parcelle de Bray).

La fig. 9a montre une bonne cohérence pour la partie de la canopée correspondant aux couronnes entre le profil moyen et la médiane des distributions statistiques (0,5 sur l'axe des abscisses) des hauteurs détectées (surface supérieure de canopée, maximum de l'écho lidar et surface inférieure de la canopée). Pour un vol avec un angle de visée du lidar à 20° par rapport au nadir, la figure 9b montre des résultats très proches de ceux obtenus en visée nadir (avec des différences de l'ordre de 0,5 m sur la moyenne). L'angle de visée a donc une faible influence sur les profils de canopée mesurés avec ce système. En revanche, une réduction

significative (~2 m) de la hauteur de la surface supérieure de la canopée a été observée lorsque la hauteur de vol passe de 300 à 500 m d'altitude (Figure 9c). En effet, en raison de l'augmentation du niveau de bruit avec le carré de la distance au lidar, le signal ne devient significatif qu'après avoir été rétrodiffusé par une quantité supérieure de végétation à une hauteur donnée. Ainsi, pour une essence comme le pin qui présente une densité de feuillage assez faible, on a tendance à sous-estimer la hauteur de la surface supérieure de la canopée. En revanche, la hauteur moyenne de la surface inférieure de la canopée et la hauteur de l'écho maximum lidar (hors sol) sont du même ordre pour les trois configurations de mesures ($\pm 0,5$ m). La robustesse de la mesure de ces hauteurs est probablement liée à une densité de matériel végétal (feuillage et branches) plus importantes dans ces parties de l'arbre. Des résultats similaires ($\pm 0,5$ m) pour les quatre hauteurs moyennes ont été obtenus en analysant individuellement les quadrants nord, sud, est et ouest de la parcelle (avec une différence de l'ordre d'un mètre entre quadrants). De même, nous envisageons de comparer les profils lidar moyens et les densités de probabilités cumulées entre lignes d'un même vol. Cependant les peuplements étant homogènes et le nombre de mesure élevé il est probable que la tendance observée se confirme.

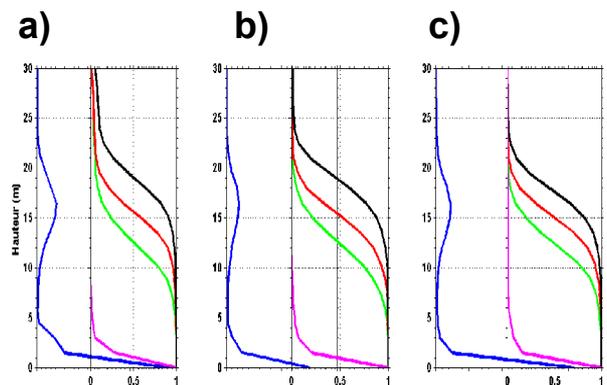


Figure 9 : Profil moyen lidar (bleu) et distributions cumulées des hauteurs de la surface supérieure de la canopée (noir), de l'écho maximum (rouge), de la surface inférieure de la canopée (vert) et du sous-bois (rose). (a) Visée nadir pour un vol à 300 m par rapport au sol, (b) Visée à 20° pour un vol à 300 m par rapport au sol et (c) Visée nadir pour un vol à 500 m par rapport au sol.

6. Conclusions et perspectives

Les expériences que nous avons conduites dans la forêt des Landes ont démontré la faisabilité de la mesure des structures verticales principales du couvert forestier. En particulier, nous avons été en mesure de restituer la répartition statistique de la hauteur de la

canopée forestière. L'approche expérimentale mise en œuvre, utilisant un lidar ultraviolet embarqué sur un petit porteur ULM très maniable, constitue un outil performant afin d'évaluer les capacités d'un lidar embarqué sur satellite pour la restitution de la canopée forestière à l'échelle globale. La sous-estimation des hauteurs de la canopée observée dans le cas d'une altitude de vol plus élevée montre qu'il est important, lors de la conception des futurs lidars spatiaux, de prendre en compte les effets conjugués du rapport signal bruit et de la taille d'empreinte sur la qualité de l'estimation des paramètres structuraux de la canopée à partir du signal lidar. Des développements instrumentaux en cours permettront de disposer d'un lidar aéroporté dédié avec une résolution verticale plus fine (avec pas d'échantillonnage de 37 cm) pour mieux décrire l'évolution annuelle de la croissance de la canopée forestière (avec environ 1 m par an) à travers la détection plus précise de la surface supérieure de la canopée et de l'écho du sol. Une cadence plus rapide d'émission laser (100 Hz) permettra d'atteindre un échantillonnage horizontal de quelques dizaines de centimètres, améliorant ainsi la précision des paramètres structuraux restitués.

Les observations collectées ont servi pour effectuer une caractérisation cohérente de différentes parcelles de pins maritimes, ainsi qu'une évaluation de nouvelles techniques expérimentales. Des travaux en cours permettront la comparaison avec des paramètres forestiers in situ (hauteurs, biomasse) et des produits issus de missions spatiales actuelles (ICESAT, CALIPSO).

D'autres expériences sont prévues en 2009-2010, notamment sur différents couverts végétaux (feuillus, résineux), en vue de l'optimisation de l'instrument lidar et de la méthodologie associée. L'objectif est d'aboutir à la définition d'un outil multifonction pour mesurer à la fois la canopée forestière et les aérosols atmosphériques qui renseignent sur les structures verticales de basse couche.

7. Remerciements :

Les auteurs remercient le Centre National des Etudes Spatiales (CNES) pour son soutien financier dans le cadre du programme EX-FOLIO, le Commissariat à l'Energie Atomique (CEA), le Centre National de Recherche Scientifique et le programme LEFFE, qui ont permis de réaliser cette expérience. Dans la région des Landes, nous avons été accueillis très chaleureusement par l'INRA (Mme. D. Guyon), la commune de Mimizan (Mme. Dehureau Foidart et M. Bertrand) et la propriétaire des parcelles de Mimizan (Mme S. Gaston). Nous remercions tout particulièrement les personnels des aérodromes d'Arcachon et de Mimizan pour leur aide et leur soutien durant l'expérience.

8. Références :

Berthier S., Chazette P., Pelon J., Baum B., 2008. *Comparison of cloud statistics from spaceborne lidar systems*, Atmos. Chem. Phys., N° 8, pp. 6965–6977.

Chazette P., J. Sanak, F. Dulac. 2007. *New Approach for Aerosol Profiling with a Lidar Onboard an Ultralight Aircraft: Application to the African Monsoon Multidisciplinary Analysis*. Environ. Sci. Technol., N°41(24), pp. 8335–8341

Dauzat J., M. Stefas, A. Chauve, Y. Caraglio, S. Durrieu. *Simulation de mesures lidar par tracé de rayons sur des plantes virtuelles*. Communication au colloque SFPT des Techniques Laser Pour L'étude Des Environnements Naturels Et Urbains. 20-21 janvier 2009.

Durrieu, S., 2007. *Le lidar à retour d'onde complet, nature de l'information enregistrée et perspectives d'utilisation*. Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection, N° 186.

Flamant, P.H., 2005. *Atmospheric and meteorological Lidar: from pioneers to space applications* C. R. Physique N° 6, pp. 864–875.

Guyon, D., P. Berbigier, G. Courrier, J.-P. Lagouarde, P. Moreau. 2003. *Estimation du LAI dans un écosystème cultivé de pin maritime à partir de mesures de fractions de trouées directionnelles* J. Can. Télédétection, Vol. 29, No. 3, pp. 336–348

Lefsky M.A., D. Harding, W.B. Cohen, G.G. Parker. 1999. *Surface lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of eastern Maryland, USA*. Remote Sensing of Environment, N° 67, pp. 83–98.

Lefsky M.A., W.B. Cohen, G.G. Parker and D.J. Harding. 2002. *Lidar Remote Sensing for Ecosystem Studies*. BioScience. Vol. 52 N° 1, pp. 19-30.

St-Onge B., 2005. *LiDAR remote sensing: Overview of technology and applications*. Proceedings of the 26th Canadian Symposium on Remote Sensing, p. 491.

Winker D.M., Pelon J., McCormick M.P., 2003. *The CALIPSO mission: Spaceborne lidar for observation of aerosols and clouds*. Lidar Remote Sensing for Industry and Environment Monitoring III, N° 4893, pp. 1-11.

Zwally H.J., Schutz B., Abdalati W., Abshire J., Bentley C., Brenner A., Bufton J., Dezio J., Hancock D., Harding D., Herring T., Minster B., Quinn K., Palm S., Spinhirne J., Thomas R., 2002. *ICESat's laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean, and land*. Journal of Geodynamics, N° 34(3-4), pp. 405-445.