

Le lidar topographique à retour d'onde complète : état de l'art

Full waveform topographic lidar : state-of-the-art

C. Mallet¹, F. Bretar¹

¹Laboratoire MATIS – Institut Géographique National
2-4 Avenue Pasteur, 94165 Saint-Mandé Cedex France
Clement.Mallet@ign.fr, Frederic.Bretar@ign.fr

Manuscrit reçu le 5 mars 2007

Résumé et mots clés

Nous présentons une étude bibliographique sur les systèmes lidar topographiques à retour d'onde complète, aussi nommés lidar full-waveform, ainsi que sur les données générées. Le contexte de cette étude se situe dans le domaine de la télédétection aérienne et spatiale par systèmes actifs. Les bases théoriques de ces systèmes sont tout d'abord décrites ainsi que les applications technologiques induites. Ensuite, nous présentons les principaux capteurs à retour d'onde complète avec les spécifications techniques. Alors, à la lumière d'articles publiés dans la littérature scientifique, nous abordons les mécanismes de traitement des données brutes, modélisation et analyse quantitative des données extraites. Enfin, les thématiques d'applications liées à la cartographie des milieux forestiers et urbains sont évoquées, mettant en avant le potentiel de ces données lidar.

laser aéroporté, lidar à retour d'onde complète, état de l'art, analyse de l'onde retour, thématiques d'exploitation.

Abstract and key words

We present a survey of the literature available on full-waveform lidar systems and resulting data. This survey concerns satellite and aerial remote sensing using active systems. Full-waveform airborne laser scanning theoretical principles are first described as well as their technological applications. Besides, main full-wave sensors and their specifications are presented. Furthermore, a review of digitized received signal processes and extracted data analysis are tackled. Eventually, topics of interest dealing with the interpretation of full-waveform measures are discussed, especially vegetation structural parameters estimation and forest and urban modeling, showing the potentiality of such data.

Airborne laser scanning, full-waveform lidar, literature survey, waveform analysis, topics of interest.

1. Introduction

Depuis quelques années, la technique de télémétrie laser, ou LiDAR¹, adaptée au contexte aérien fournit une mesure de distance entre le vecteur aérien et la surface terrestre. Le calcul de la trajectographie du vecteur aérien basée sur le couplage d'une centrale inertielle et d'un GPS différentiel permet de transformer ces mesures de distance en points 3D. La précision altimétrique de la mesure est particulièrement élevée ($< 0,15$ m) en lidar topographique et permet également d'acquérir plusieurs points de mesure le long de l'onde réfléchie. Cette propriété est intéressante car elle permet, en milieu forestier notamment, d'accéder non seulement à la hauteur de la canopée mais aussi à l'altitude du sol sous la végétation. Le laser aéroporté s'avère en outre la seule méthode de levé performante dans certaines applications cartographiques spécifiques comme le suivi de corridors, ou la génération de modèles numériques de terrain sous couvert végétal.

La capacité des systèmes lidar à fournir de manière rapide et précise des nuages de points 3D permet le développement de nouvelles méthodologies de cartographie automatique (détection et la classification d'objets présents dans ces scènes essentiellement) [Haala et Brenner, 1999 ; Filin, 2002 ; Sithole, 2005 ; Bretar, 2006].

De nouveaux systèmes lidar, opérationnels depuis 2004, ont été conçus avec la capacité de numériser l'intégralité du signal retour. On les nomme **lidar à retour d'onde complète** (ou lidar **full-waveform**). La technologie actuelle permet ainsi d'enregistrer beaucoup plus que de simples points 3D en analysant notamment des formes d'ondes rétrodiffusées par les éléments de la surface présents au sein du cône de diffraction laser².

L'objectif de cet article est de présenter un état de l'art de ces systèmes à retour d'onde complète ainsi que les traitements appliqués à ce type de données. La première partie de cet article sera consacrée à la description physique des systèmes lidar et à la mise en lumière de l'apport théorique des systèmes full-waveform par rapport aux systèmes classiques. La deuxième partie est une taxinomie des systèmes *full-waveform* testés de manière opérationnelle. Nous poursuivrons en explicitant les méthodes de traitements des signaux rétrodiffusés avant d'évoquer les comportements du signal en fonction de paramètres géométriques et réfléchissants des surfaces. Nous terminerons par une description détaillée d'une utilisation quantitative des données *full-wave* pour l'étude et la modélisation du milieu forestier et par quelques mots sur les potentialités en milieu urbain.

1. Light Detection And Ranging.

2. Nous parlerons dans cet article de « cône » et non de « tache de diffraction » pour souligner le fait que le faisceau laser durant son parcours englobe des objets à des altitudes différentes alors que le terme « tache » réduit le faisceau laser à son empreinte au sol.

2. Les systèmes Lidar topographiques

2.1. Le Lidar aéroporté

2.1.1. Introduction

Un LiDAR topographique est un télémètre laser permettant une acquisition fiable, rapide et précise de nuages de points en 3D géoréférencés [Baltsavias, 1999a]. Ces capteurs actifs, le plus souvent aéroportés mais aussi embarqués sur des plateformes satellitaires, ont été originellement conçus dans les années 1970. D'abord sous forme de profils altimétriques le long de la trajectoire du vecteur, la donnée altimétrique est maintenant acquise sous forme de bandes de largeur variable (150 m à 600 m) grâce à un mécanisme de déviation du faisceau. Cette technologie fournit une plus forte densité (jusqu'à plus de 100 pts/m²) et une plus grande homogénéité des points sur la surface terrestre.

Ses applications sont désormais nombreuses dans la métrologie (cas d'un système statique), la géophysique, l'estimation de paramètres forestiers, la détection de cibles, de lignes à haute tension, le levé de corridors, de côtes ou l'étude de la physique de l'atmosphère [Drobinski *et al*, 2000].

2.1.2. Principes physiques

Le principe de fonctionnement d'un lidar aéroporté (ou ALS pour *Airborne Laser Scanning*) consiste en l'émission d'une série d'impulsions laser de formes gaussiennes (de 5 à 10 ns) et de fréquence temporelle élevée. Ces impulsions sont ensuite enregistrées après diffusion sur la surface terrestre.

L'onde électromagnétique émise interagit avec les composantes qu'elle rencontre. Elle subit d'abord des modifications dues à la traversée de l'atmosphère (diffusions et absorption par les particules présentes), dont l'influence est mineure. Les principales modifications du signal reçu au niveau du détecteur sont provoquées par les objets rencontrés au niveau de la surface terrestre. La distance entre ces objets et l'avion est déduite de la mesure du demi-temps d'aller-retour de l'impulsion.

La majorité des systèmes utilise des longueurs d'onde appartenant au proche infra-rouge (entre 0,8 et 1,55 μ m). La fréquence temporelle d'émission des impulsions est contingentée par le mode d'acquisition (paragraphe 2.2) ainsi que par l'altitude de vol. Le déclenchement de l'émission d'une impulsion s'effectue lorsque le retour de l'onde précédente est effectif³.

L'obtention de points géoréférencés passe par une connaissance très précise de la trajectographie du capteur, de la localisation de l'émetteur/récepteur laser. Le système de géoréférencement

3. La cadence de tir est en fait constante. Ainsi, par exemple, à 50 kHz, il n'y a pas de problème d'attente du retour jusqu'à 3 km de distance. En lidar aéroporté, nous ne sommes jamais dans ces cas limites.

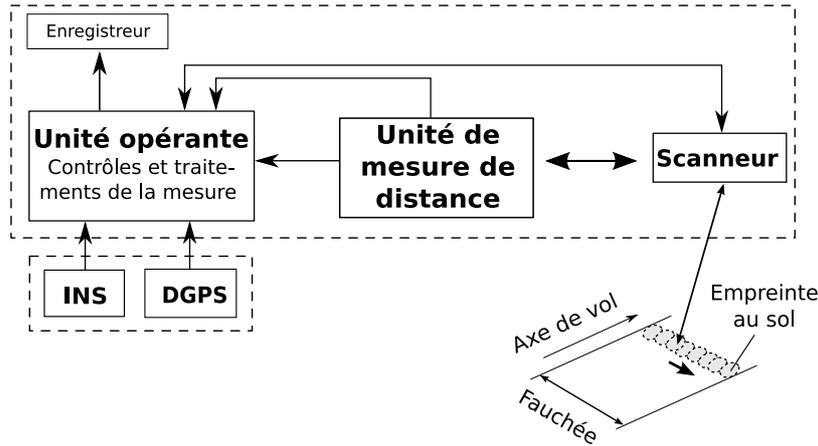


Figure 1. Configuration minimale d'un système laser aéroporté. DGPS: GPS différentiel, INS: centrale à inertie.

intègre un GPS (mesures différentielles avec une station au sol implantée à proximité de la zone survolée) couplé à une centrale inertielle (INS). Au final, un lidar est composé de l'émetteur et du récepteur laser (unité de collection de l'onde rétrodiffusée, de mesure de distance et de comptage de photons), du scanner, du système hybride de positionnement et d'une chaîne de traitement qui quantifie le signal reçu (figure 1). Il s'agit d'une unité englobant contrôle et synchronisation des mesures, traitements temps-réel pour l'extraction des points géoréférencés et stockage de toutes les mesures et des points calculés [Balsavias, 1999b ; Thiel et Wehr, 2004].

2.1.3. Formulation physique de la mesure lidar

L'équation radar fournit une formulation fondamentale pour décrire le processus de mesure en tenant compte des caractéristiques du capteur et de la cible. Elle représente le bilan des puissances sur le trajet aller-retour d'une onde émise et détermine l'intensité de l'impulsion reçue par le système. Ainsi, dans un cas monostatique (émetteur et récepteur font partie du même dispositif), nous avons :

$$P_r = P_t \frac{G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (1)$$

avec : P_r , la puissance reçue, P_t , la puissance transmise, G , le gain de l'antenne (émettrice et réceptrice), λ , la longueur d'onde, σ , la section efficace radar (le coefficient de réflexion de la cible) et R , la distance cible-système.

Cette formulation est générale. Un facteur de transmission atmosphérique η_{atm} peut, si besoin, être ajouté et le gain de l'antenne précisé. De même, la section efficace radar pourrait être développée. De son côté, G peut s'écrire $G^2 = G_0^2 \eta_{sys}$ où G_0 est le gain maximal et η_{sys} le facteur de transmission du système, comprenant en particulier la fonction d'illumination de l'antenne. Si $G_0 = \frac{4\pi S}{\lambda^2}$ où S est la surface de l'antenne, l'équation fondamentale pour les systèmes lidar peut s'écrire [Wagner *et al*, 2006] :

$$P_r = \frac{P_t D^4}{4\pi R^4 \lambda^2} \eta_{sys} \eta_{atm} \sigma \quad (2)$$

Des formulations plus explicites de l'équation 2 ont été proposées par certains auteurs [Der *et al.*, 1997 ; Carlsson *et al.*, 2001] (équation 3). Les effets atmosphériques comprenant élargissement du faisceau, scintillation et atténuation due aux aérosols peuvent être précisés et explicitement formulés tout comme l'influence de la cible (en tenant compte de sa structure géométrique et de sa BRDF (Bidirectional Reflection Density Function) pour décrire ses propriétés de réflectance. Ainsi,

$$P_r = \eta_{sys} \frac{E_p}{2\tau} \underbrace{\rho \frac{\pi D^2}{4R^2}}_{BRDF} e^{2\Phi_{aer} R} \quad (3)$$

où $E_p/2\tau$ est le pic d'intensité du signal, τ nous renseigne sur la largeur de l'impulsion (le *Full-Width-at-Half-Maximum*⁴), ρ la BRDF par stéradian, le terme suivant étant le nombre de stéradians couverts par l'ouverture du système de réception, du point de vue de la cible rétrodiffusante. Enfin, le dernier facteur $e^{2\Phi_{aer} R}$ est l'atténuation des aérosols, Φ_{aer} étant fonction de λ et de la distance de visibilité.

Les équations 2 et 3 ne sont valables que pour des sources ponctuelles uniques ou pour des surfaces de faible pente. Dans le cas de cibles distribuées spatialement (le faisceau peut rencontrer un nombre N d'objets entre le vecteur aérien et le sol), la puissance du signal retour est la superposition des échos provenant de cibles à différentes distances. Elle peut être exprimée sous forme intégrale par :

$$P_r(t) = \frac{D^4}{4\pi \lambda^2} \int_0^H \frac{\eta_{sys} \eta_{atm}}{R^4} P_t(t - \frac{2R}{v_g}) \sigma(R) dR \quad (4)$$

4. Le FWHM définit la largeur de l'impulsion en donnant sa valeur à la moitié de l'amplitude maximum du pic.

où t est le temps, v_g la vitesse de groupe de l'impulsion laser et $\sigma(R)dR$ la section efficace différentielle « apparente »⁵.

La puissance reçue par le système peut également être considérée comme la somme des contributions des N objets rétrodiffusants aux caractéristiques propres :

$$P_r(t) = \sum_{i=1}^N P_{r,i}(t) * \eta_{sys}(t) * \eta_{atm}(t) \tag{5}$$

où $P_{r,i}(t)$ représente l'écho du $i^{\text{ème}}$ objet s'écrivant :

$$P_{r,i}(t) = \frac{D^2}{4\pi\lambda^2} \int_{R_i-\Delta R}^{R_i+\Delta R} \frac{1}{R^4} P_i(t - \frac{2R}{v_g}) \sigma_i(R) dR \tag{6}$$

avec R_i sa distance moyenne, l'intervalle $[R_i - \Delta R, R_i + \Delta R]$ son extension spatiale et $\sigma_i(R)$ sa section efficace rétrodiffusante différentielle. La rétrodiffusion d'un objet est donc le résultat d'une convolution entre l'impulsion transmise et la section efficace différentielle. Ainsi, dans le cas où $\Delta R \ll R$, nous avons :

$$P_{r,i}(t) \approx \frac{D^2}{4\pi\lambda^2 R_i^2} P_i(t) * \sigma'_i(t) \tag{7}$$

La formulation finale de la puissance reçue par un système lidar au cours du temps peut alors s'écrire :

$$P_r(t) = \sum_{i=1}^N \frac{D^2}{4\pi\lambda^2 R_i^2} \underbrace{P_i(t) * \eta_{sys}(t)}_{\text{contribution du système}} * \underbrace{\eta_{atm}(t) * \sigma'_i(t)}_{\text{contribution du milieu}} \tag{8}$$

2.2. Technologie des lidar topographiques

2.2.1. Mode multi échos

Les premiers lidar apparus dans le commerce n'enregistraient le temps de retour que d'un seul écho rétrodiffusé. Cela suffit s'il n'y a qu'une seule cible dans le cône de diffraction. Cependant, même pour de petites taches au sol (0,2 – 2 m), il est très fréquent d'atteindre plusieurs objets. Du fait de la séparabilité du faisceau laser, plusieurs rétrodiffusions propres à chaque objet rencontré sont alors générées. Aujourd'hui la totalité des systèmes actuels (dits multi-échos « ME ») mesurent le premier et la dernière impulsion alors que certains peuvent enregistrer jusqu'à six échos pour une unique impulsion [Thiel et Wehr, 2004]. Les deux premiers échos concentrent environ 90 % de l'énergie totale réfléchi. La détection en temps réel d'un nombre d'échos supérieur à 5 consiste donc à détecter un signal de faible énergie au sein d'un bruit de mesure non négligeable. De manière générale, en présence de sursol pérenne⁶, il existe un unique écho (sol nu, bâtiment). En présence de végétation peu dense, le

5. Apparente car pour un objet rétrodiffusant, l'impulsion à la hauteur R peut masquer un objet présent à $R + \delta R$, qui lui ne contribue pas au retour du faisceau.

6. On entend par sursol tous les objets au dessus du terrain naturel : végétation, bâtiments, infrastructures...

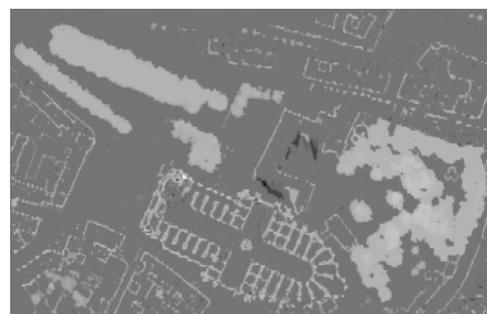
premier écho correspond à la cîme des arbres alors que le dernier écho est associé au sol. Cela est montré sur la figure 2 avec une comparaison entre l'altitude des premier et dernier échos laser sur une zone urbaine. La couleur de plus en plus foncée indique une différence en altitude de plus en plus faible entre modèles numériques d'élévation (3 m → 0 m).

2.2.2. Qualité géométrique du levé laser

La technique d'acquisition évoquée précédemment assure aux données une qualité théorique intrinsèque élevée. Les points 3D laser sont reconnus pour leur bonne précision altimétrique ($< 0,15$ m), leur bonne qualité planimétrique ($< 0,40$ m), leur capacité d'atteindre le sol en présence de végétation peu dense et leur robustesse [Ahokas *et al.*, 2003]. En effet, les données laser sont faiblement bruitées car obtenues par mesures temporelles. On ne passe pas par une étape de mise en correspondance entre images comme c'est le cas lors des processus de corrélation en photogrammétrie numérique pour obtenir l'altimétrie et qui génère certains artefacts [Kasser et Egels, 2001]. Malgré cela, on observe certaines imperfections. L'échantillonnage spatial irrégulier reste un problème majeur, la densité de points excédant rarement les 20 pts/m² pour les applications les plus exigeantes. L'absence d'informations fournies par les prestataires sur les méthodes de calcul des points 3D à partir des informations de distance en temps-réel et sur les données iner-



(a) Orthophotographie (résolution 0,25 m) sur la ville d'Amiens.



(b) Image des différences entre des Modèles Numériques d'Élévation premier et dernier écho.

Figure 2. Comparaison entre les premier et dernier échos d'une onde lidar, mettant en évidence les zones de végétation.

tielles/GPS rend difficile la connaissance des erreurs locales de mesure au sein du nuage de points [Bretar, 2006]. Les facteurs y contribuant sont pourtant nombreux [Huising et Pereira, 1998]. Elles peuvent être systématiques (erreur sur la mesure de l'angle du miroir, problèmes de synchronisation et d'intégration des mesures en « hardware », mauvaises coordinations GPS/INS, géométrie du terrain si le sol contenu à l'intérieur de la tache de diffraction présente de fortes discontinuités altimétriques...) ou aléatoires (dérives temporelles de la centrale inertielle, variations du rapport S/N du signal retour, de la largeur de la tache de diffraction ou réflectivité des matériaux), liées à l'acquisition des données, au terrain ou au parcours du rayon. Un descriptif plus détaillé de la détermination de la position de l'avion est présenté dans [Bretar, 2006] alors que [Huising et Pereira, 1998] chiffrent les principales sources d'erreurs dans la mesure laser pour différents capteurs.

2.2.3. Extraction des pics d'intensité

Les méthodes de détection temps-réel des pics d'intensité (échos) au sein de l'onde rétrodiffusée sont nombreuses et varient en fonction des systèmes utilisés. Aucune ne se détache des autres ni par sa précision ni par sa robustesse [Wagner *et al.*, 2004]. La précision sur la mesure de distance varie donc en fonction de la forme de l'onde retour. Les méthodes de détection les plus utilisées sont :

- Seuillage de l'intensité : extraction d'un écho dès que le signal dépasse un seuil fixé.
- Centre de gravité : elle tient compte de tous les points supérieurs en intensité au seuil choisi. Les suivantes sont plus sophistiquées car basées sur des différences finies sur des dérivées du signal.
- Détection des maxima locaux d'intensité dans le signal.
- Recherche de passages par zéro de la dérivée seconde du signal ou plus généralement d'une combinaison linéaire de versions décalées temporellement du signal.
- Méthode de la fraction constante déterminant les passages par zéro de la différence entre des versions atténuée et retardée temporellement du signal.

Ces trois dernières méthodes sont invariantes aux variations d'amplitude et aux changements de largeur de l'impulsion. Elles permettent de plus l'élimination des « faux échos » dus au bruit, (impératif car toute méthode dérivant le signal, surtout deux fois augmente toujours beaucoup le bruit). La figure 3 décrit sur un exemple la non-détection de pics d'intensité le long de l'onde retour.

Un décalage au cours du temps entre la position détectée et réelle de l'écho entraîne une perte de précision sur la mesure (pouvant atteindre le décimètre) alors que l'extraction du nombre erroné d'obstacles conduit à une fausse interprétation de la scène. Rien ne peut alors justifier que le premier écho soit véritablement la cime des arbres. En effet, supposons que le sol soit recouvert de végétation basse. La dynamique du mécanisme de seuillage du système ne permettra pas de discerner les deux élé-

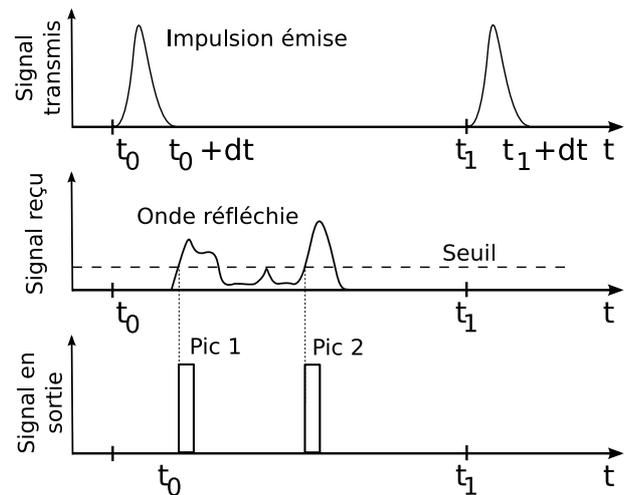


Figure 3. Émission simplifiée d'une impulsion laser (en haut) et sa réception (au milieu). Par seuillage, le système détecte deux pics (en bas). Il générera deux échos pour cette impulsion au lieu de trois.

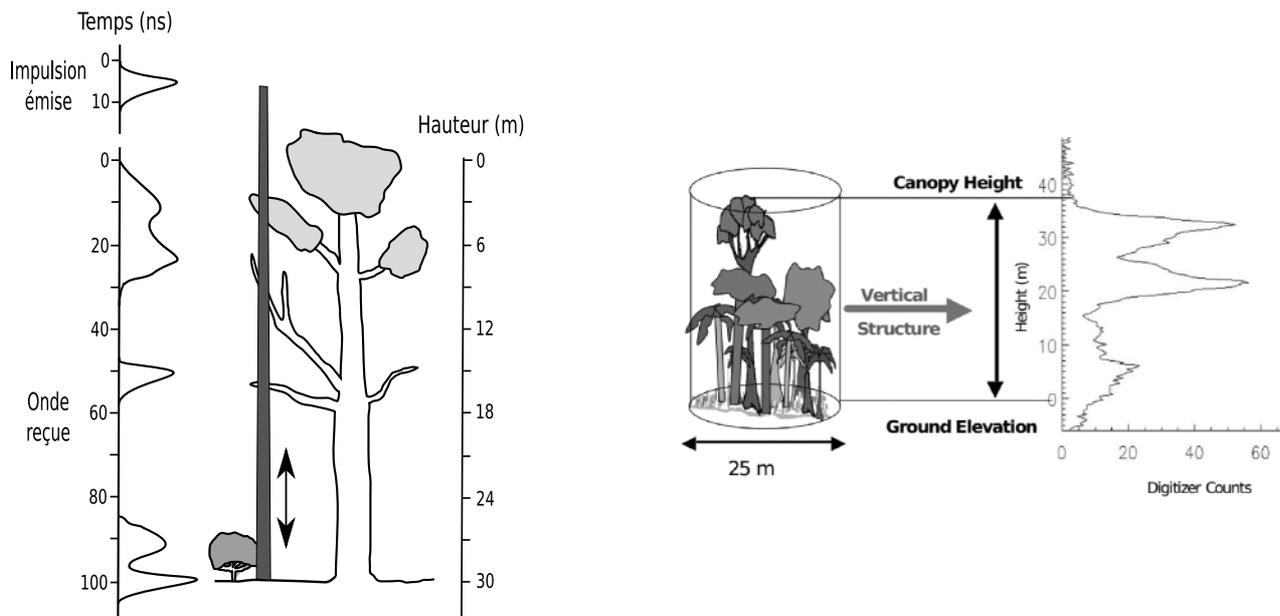
ments le long de l'onde si les différences altimétriques ne sont pas suffisantes ($> 1,5$ m). Un seul point sera détecté et situé approximativement entre les deux cibles. Les conséquences de ces erreurs sont d'autant plus importantes que l'utilisation la plus répandue des nuages de points laser « dernier écho » est la génération de Modèles Numériques de Terrain (MNT)⁷

2.2.4. L'avènement des lidar à retour d'onde complète

L'enregistrement de l'intégralité de l'onde retour résoud en partie le problème des sur/sous-détections des pics d'intensité. La première version véritablement opérationnelle de tels systèmes est apparue en 1999 [Blair *et al.*, 1999] et les premiers lidar commerciaux datent de 2003-2004 [Hug *et al.*, 2004]. Le chapitre 3 décrit de manière complète les caractéristiques techniques des capteurs construits à ce jour. Ces systèmes à **retour d'onde complète** (OC) ou **full-wave(form)** (FW) échantillonnent l'onde retour à une fréquence d'environ 1 GHz. Ils permettent de connaître la distribution verticale des cibles atteintes par le laser au sein du cône de diffraction.

Si la distribution altimétrique des éléments présents dans le cône de diffraction suit une loi gaussienne [Zwally *et al.*, 2002], et en négligeant les effets de rétrodiffusion de l'atmosphère, on peut modéliser $P_r(t)$ (équation 8) par une somme de n gaussiennes ($n \in \mathbb{N}$) aux paramètres spécifiques [Brenner *et al.*, 03]. Cette modélisation réduit la complexité de l'équation 8 et facilite le traitement des données FW (voir la partie 4).

7. Un MNT est l'ensemble des points permettant une description du terrain nu ou sous végétation. Il s'agit d'une représentation maillée de toute la surface topographique. Cette représentation est la plupart du temps une représentation $2D^{1/2}$ sous forme d'une grille d'altitude fournissant pour chaque (u, v) l'altimétrie z du terrain. Le géoréférencement de la grille intrinsèque permet alors de définir un point 3D (X, Y, Z) correspondant.



(a) Émission et réception d'une impulsion laser sur une zone de végétation complexe avec un lidar petite empreinte.

(b) Exemple d'onde retour en milieu forestier pour le capteur à large empreinte Laser Vegetation Imaging Sensor (LVIS) [Drake *et al.*, 2002a].

Figure 4. Exemples d'ondes rétrodiffusées en milieu forestier pour des systèmes lidar petite et grande empreintes.



Les capteurs à retour d'onde complète se déclinent en deux grandes catégories. Les systèmes à petite empreinte au sol (*small footprint lidar*) couvrent des surfaces de 0,2 à 3 m de diamètre. Ils fournissent une haute densité de points et permettent une description fine de l'altimétrie dans le cône de diffraction (figure 4(a)). Cependant, la couverture de larges zones avec de tels capteurs requiert des acquisitions en grand nombre. De plus, les systèmes à faible tache au sol présentent l'inconvénient de ne pas toujours atteindre le sol en présence de végétation dense et de fréquemment manquer la cime des arbres. Ainsi, les hauteurs des arbres et du sol ne sont pas estimées précisément [Dubayah et Blair, 2000]. D'autre part, les systèmes à large empreinte au sol (*large footprint lidar*) ont pour objectif de couvrir de larges zones et évitent les problèmes rencontrés avec les capteurs petite empreinte. Avec des taches au sol comprises entre 10 et 70 m de diamètre, ces systèmes, surtout spatiaux, permettent d'intégrer les contributions du sursol sur une zone plus grande et augmentent la probabilité d'atteindre le sol sous végétation. Toutefois, la densité de points est plus faible et les profils altimétriques obtenus sont moyennés (figure 4(b)).

2.2.5. Enregistrement des données FW

Les premiers prototypes de lidar à retour d'onde complète datent des années 1970 mais le premier système opérationnel n'apparaît qu'en 1999 [Blair *et al.*, 1999a]. Les principales firmes commerciales ont doté leurs systèmes de boîtiers de numérisation et ont augmenté les capacités de stockages de leurs unités de sauvegarde (*cf.* partie 3.4). Deux principales techniques de détection existent pour enregistrer les caractéristiques temporelles du signal rétrodiffusé : la détection simple et multiple de photons.

La **détection multi-photons** utilise de manière classique une photodiode qui génère un signal électrique directement proportionnel à la puissance optique de la lumière incidente. Les unités de réception et de numérisation convertissent le signal retour analogique en numérique puis sauvegardent les échantillons avec une bande passante de quelques gigahertz et un échantillonnage approprié. Ce double processus conduit à une baisse de la fréquence d'acquisition du lidar pour éviter tout chevauchement entre deux impulsions consécutives⁸.

En ce qui concerne la **détection simple de photons**, l'intégration de la radiation arrivant par détection multi-photons peut être vue comme la collection d'un nombre connu de photons sur une durée d'observation limitée d'une impulsion. Dans le cadre d'une plateforme fixe et d'une scène stationnaire, nous sommes en situation radiative ergodique : les propriétés statistiques d'illumination du laser ne fluctuent pas temporellement et l'évolution du signal au cours du temps amène la même information que les valeurs moyennes collectées. Cela signifie que le comptage simple de photons avec leur temps de vol par intervalle de temps dans un histogramme est très semblable à une intégration multiple de photons selon le temps. Beaucoup d'échos sont nécessaires pour obtenir une onde retour par cette méthode. La qualité du signal échantillonné dépend du nombre de photons comptés [Jutzi et Stilla, 2003]. Les systèmes utilisant une détection de photons simple opèrent donc avec moins de puissance que les systèmes multi-photons.

8. En général, la limitation nominale est le temps de transfert de l'échantillonneur rapide qui neutralise le système et force à ralentir la cadence de tir.

La numérisation, à intervalles constants, varie entre 1 et 10 ns selon les systèmes. L'onde n'est pas sauvegardée sur l'intégralité du retour mais suivant un nombre d'échantillons maximum prédéfini. En effet, il est nécessaire de ne pas enregistrer trop d'informations inutiles avant la première cible et ainsi éviter des problèmes de stockage des données. Par exemple, pour les systèmes ALTM (TopoSys, voir la partie 3.4 pour ses autres caractéristiques), 440 échantillons sont réservés pour caractériser chaque impulsion. Ceci est équivalent à une tranche d'altitude continue de 66 mètres ($440 \times 0,15$ m par échantillon). Le système MarkII (TopEye) sauvegarde 128 échantillons selon un mode prédéfini qui est soit «*first pulse and later*» (127 échantillons suivant le premier) soit «*last pulse and earlier*» (127 échantillons précédant le dernier détecté). Cela signifie que les systèmes FW n'enregistreront pas dans une même onde retour les échos de la cime d'un arbre et du sol si la taille de cet arbre dépasse la «longueur» d'enregistrement du système.

3. Typologie des systèmes lidar Full-Waveform

3.1. Les lidar expérimentaux

Les systèmes à large empreinte développés par la NASA ont vocation à caractériser le milieu forestier pour certains et à cartographier les zones d'occupations du sol pour d'autres.

- **Scanning Lidar Imager of Canopies by Echo Recovery (SLICER)**: système topographique précurseur de tous ceux évoqués par la suite, son objectif est la caractérisation de la structure verticale de la canopée. Il est dans sa catégorie celui qui a la plus petite tache au sol (10 m environ) et résolution temporelle (0,11 m). SLICER a démontré la pertinence des systèmes *full-waveform* pour extraire des paramètres forestiers, discriminer les âges, les espèces et caractériser la structure de zones assez étendues [Lefsky *et al.*, 1999]. Des données sont téléchargeables sur le site Internet du capteur [SLI, 2006].

- **Shuttle Laser Altimeter (SLA)**: sa vocation est beaucoup plus large car l'objectif de cet instrument était de couvrir océans, nuages et géosciences (glaciologie, tectonique, hydrologie, géomorphologie...). Il a connu deux versions SLA-01 et 02 (1996-1997) servant d'étude de faisabilité pour les systèmes MBLA et GLAS (*cf.* ci-après). Il a également été utilisé pour vérifier la précision de MNT mondiaux de résolution 1 km et ainsi caractériser certains biais systématiques [Harding *et al.*, 1999]. Contrairement à SLICER, SLA fut embarqué sur une plateforme satellitale.

- **Laser Vegetation Imaging Sensor (LVIS)**: cette version avancée de SLICER a servi de test et de fournisseur de données pour le développement d'algorithmes, la calibration des instru-

ments, l'évaluation de la performance des mesures pour la validation de la future mission Vegetation Canopy Lidar (VCL, *cf.* système MBLA). Il a également prouvé le potentiel des données *full-waveform* pour la caractérisation de zones forestières et la restitution de la topographie y compris sous la canopée [Blair *et al.*, 1999]. Il a permis le développement d'un algorithme de classification temps-réel des points sol par analyse de l'onde retour. Les données de ce système sont publiques [LVI, 2007].

- **Multi-Beam Laser Altimeter (MBLA)**: il fait partie de la mission VCL (Vegetation Canopy Lidar) [Dubayah *et al.*, 1997]. Son objectif était de mettre en orbite le capteur MBLA pour fournir les données nécessaires aux calculs de densité, de masse de végétation pour suivre à l'échelle planétaire l'évolution des capacités d'absorption du CO₂ par les forêts. Le système devait comprendre trois lidar d'empreinte au sol de 25 m opérant parallèlement pour une fauchée globale de 8 km [VCL, 2006]. Le programme qui devait être lancé en 2003 a depuis été abandonné.

- **Geoscience Laser Altimeter System (GLAS)**: la mission satellite ICESAT, embarquant le capteur GLAS, a pour objectif l'étude de l'évolution temporelle des masses glaciaires terrestres et océaniques en Antarctique et Groenland, la rugosité et l'épaisseur de la glace de mer, la topographie (via un laser à 1064 nm) et la structure verticale des nuages et des aérosols (laser à 532 nm) [GLA, 2006]. ICESAT fournit une classification temps-réel de l'onde retour en terre/glace et banquise/océan par analyse du retour d'onde par reconnaissance de distributions de gaussiennes dont on extrait des principales caractéristiques [Brenner *et al.*, 2003]. Des jeux de données test sont disponibles sur le site de la mission [ICE, 2006].

3.2. Les lidar bathymétriques

Les lidar bathymétriques sont historiquement les premiers lidar *full-waveform* [Guenther et Mesick, 1988]. Ils sont constitués de deux faisceaux: un vert (532 nm) et un infra-rouge (1064 nm). Le premier permet de franchir l'interface air-eau et de se propager dans l'eau sans trop d'atténuation alors que le second indique la hauteur de l'avion par rapport à la surface de l'eau⁹.

Six systèmes existent à l'heure actuelle: **LARSEN-500**, le premier système bathymétrique, **LADS** (Laser Airborne Depth Sounder), et sa version améliorée, **LADS MarkII**, développés pour le relevé des côtes australiennes, la série des **SHOALS** (Scanning Hydrographic Operational Airborne Lidar Survey), pleinement opérationnelle depuis 1994, **Hawk Eye**, développé pour la Suède sur un modèle similaire à SHOALS et **EAARL** (Experimental Advanced Airborne Research Lidar), développé par la NASA en 2002. Leurs principales caractéristiques techniques sont détaillées dans la partie 3.4.

9. Nous ne détaillerons pas ces systèmes dans cette partie. Pour plus d'informations, il est possible de se référer à [Guenther *et al.*, 2000].



Tableau 1. Principales caractéristiques techniques de lidar à retour d'onde complète.

Système	Firme développeuse	Vecteur	Scanneur	Année de lancement – fin	Longueur d'onde (nm)	Altitude de vol (km)	Fréquence d'impulsion (kHz)
Expérimentaux	Slicer	aéroporté	miroir oscillant	1994-1997	1 064	< 8	0,075
	SLA-02	satellite	–	1996-1997	1 064	285	0,01
	LVIS	aéroporté	miroir oscillant	1997	1 064	< 10	0,1-0,5
	GLAS	satellite	–	2003	1 064/532	600	0,04
	MBLA	NASA/Université du Maryland	satellite	aucune	1 064	400	0,01/0,242
Bathymétriques	LARSEN 500	Terra Surveys Optech	aéroporté	1983	1 064/532	0,5	0,02
	LADS MarkII	LADS TopEye	aéroporté	1989	1 064/532	0,37-0,5	0,9
	Hawk Eye	Saab Optech	aéroporté	1990	1 064/532	0,2-0,3	0,2
	SHOALS 1000T	Armée US Optech	aéroporté	1994	1 064/532	0,2-0,4	66-100
	EAARL	NASA	aéroporté	2002	1 064/532	0,3	3
Commerciaux	LMS Q560	Riegl	aéroporté	2004	1 550	< 1,5	< 100
	Falcon III	TopoSys	aéroporté	2005	1 560	< 2,5	50-125
	MarkII	TopEye/Blom	aéroporté	2004	1 064	< 1	< 50
	ALTM 3100	Optech	aéroporté	2004	1 064	< 2,5	33-100
	ALS50	Leica	aéroporté	2006	1 064	0,2-6	< 150

Notes explicatives des tableaux 1 et 2 :

- * *Vecteur* : on distingue les lidar satellitaires des aéroportés qui comprennent ceux embarqués sur un avion ou un hélicoptère.
- * *Années de fin* : elle n'est pas renseignée si le système est toujours utilisé.
- * *Longueur d'onde* : quand deux longueurs d'onde sont indiquées (typiquement 1 064 et 532 nm), cela signifie que le système embarque deux lidar avec leur propre longueur d'onde. Il s'agit soit d'applications bathymétriques soit de satellitaires à couverture variée (terres et océans).
- * *Altitude de vol* → *Précision altimétrique* : de nombreuses caractéristiques sont chiffrées sous forme de plages de valeurs. Ce sont les données constructeurs. Elles sont contingentes par l'altitude de vol du système. Les formules pour retrouver les valeurs exactes en fonction d'une altitude *H* donnée sont présentes dans [Baltasvias, 1999a].
- * *Précision altimétrique* : il s'agit de la précision annoncée par les constructeurs des pics d'intensité dans l'onde retour à la sortie du système (après géolocalisation). Elle est à distinguer de la distance minimale entre deux points consécutifs discernables le long d'une même onde retour.
- * *Fréquence d'échantillonnage* : elle indique la fréquence de numérisation par impulsion, de l'onde retour. Les systèmes ne numérisent pas l'intégralité de l'onde mais la «tranche» contenant possiblement des informations de rétrodiffusion (par exemple, 22 m pour LVIS), donc des obstacles. Les systèmes limitent donc le nombre de points enregistrés par impulsion.

Tableau 2. Principales caractéristiques techniques de lidar à retour d'onde complète (suite).

Système	Énergie par impulsion (m.J)	Largeur de l'impulsion (ns)	Fréquence de scan (Hz)	Fauchée au sol (m)	Divergence du faisceau (mrad)	Tâche au sol (m)	Précision altimétrique (cm)	Fréq. d'échantillonnage (Hz)
Slicer	-	4	80	-	2	10 à 5 km	11	650 M
SLA-02	40	8	-	-	0,3	100	150	250 M
LVIS	5	10	500	1000-2000	8	40 à 5 km	30	500 M
GLAS	75/35	6	-	-	0,11-0,17	66	5-20	1 M
MBLA	10	5	-	8000	0,06	25	100	250 M
LARSEN 500	-	12	20	270	4	2 à 500 m	30	0,5 M
LADS MarkII	7	-	18	240	-	-	15	-
Hawk Eye	2/15	7	0,3-7	140	2-15	2,4	30	-
SHOALS 1000T	2/15	6	0,3-7	110-220	2-15	2,4	15	400
EAARL	0,07	1,3	25	240	0,03	0,15	30	1 M
LMS Q560	8	4	5-160	max 1250	0,5	0,5 à 1 km	0,02	1 M (800 au maximum)
Falcon III	-	5	165-415	max 1270	0,7	0,7 à 1 km	0,01	-
MarkII	inconnue	4	-	max 700	1	1 à 1 km	< 1	1-2 M (128 au maximum)
ALTM 3100	< 0,2	8	max 70	> 25	0,3-0,8	0,3/0,8 à 1 km	< 1	1 M
ALS50	-	-	max 90	≈500-800 usuellement	0,22	0,09-2,6	-	50 k

Notes explicatives des tableaux 1 et 2:

* *Vecteur*: on distingue les lidar satellitaires des aéroportés qui comprennent ceux embarqués sur un avion ou un hélicoptère.

* *Années de fin*: elle n'est pas renseignée si le système est toujours utilisé.

* *Longueur d'onde*: quand deux longueurs d'onde sont indiquées (typiquement 1 064 et 532 nm), cela signifie que le système embarque deux lidar avec leur propre longueur d'onde. Il s'agit soit d'applications bathymétriques soit de satellitaires à couverture variée (terres et océans).

* *Altitude de vol* → *Précision altimétrique*: de nombreuses caractéristiques sont chiffrées sous forme de plages de valeurs. Ce sont les données constructeurs. Elles sont contingentes par l'altitude de vol du système. Les formules pour retrouver les valeurs exactes en fonction d'une altitude *H* donnée sont présentes dans [Baltasvias, 1999a].

* *Précision altimétrique*: il s'agit de la précision annoncée par les constructeurs des pics d'intensité dans l'onde retour à la sortie du système (après géolocalisation). Elle est à distinguer de la distance minimale entre deux points consécutifs discernables le long d'une même onde retour.

* *Fréquence d'échantillonnage*: elle indique la fréquence de numérisation par impulsion, de l'onde retour. Les systèmes ne numérisent pas l'intégralité de l'onde mais la « tranche » contenant possiblement des informations de rétrodiffusion (par exemple, 22 m pour LVIS), donc des obstacles. Les systèmes limitent donc le nombre de points enregistrés par impulsion.



3.3. Les lidar commerciaux

Les versions opérationnelles des systèmes commerciaux datent des années 2003-2004 souvent sur la base des instruments multi-échos existants. Ces systèmes, caractérisés par une faible empreinte au sol, ont de fortes potentialités mais n'ont pas d'application dédiée [Hug *et al.*, 2004].

Les sociétés concernées sont **TOPOSYS** (Allemagne, avec les capteurs ALS50 et HARRIS 56), **Leica** (Suisse), **Riegl** (Autriche), **Optech** (Canada) et **Blom/TopEye** (Suède).

3.4. Spécifications techniques des principaux systèmes existants

Les deux tableaux suivants récapitulent les principales caractéristiques techniques des systèmes lidar évoqués dans la partie précédente.

4. Modélisation de l'onde rétrodiffusée



Chaque impulsion laser est une onde de forme gaussienne calibrée¹⁰ et de durée connue. Le signal retour collecté par le lidar est donc le résultat de la convolution de cette gaussienne avec une fonction terrain. Le traitement de ce signal consiste en :

- i) la modélisation du signal,
 - ii) l'extraction des échos significatifs et de leurs caractéristiques,
 - iii) l'analyse des éléments statistiques extraits de l'onde retour.
- Cette étape fait l'objet de la partie 5.

Les éléments statistiques qu'il est possible d'obtenir par traitement du signal sont le nombre de pics d'amplitudes significatives (nombre d'obstacles ou de groupes d'objets rétrodiffusant trop proches pour la résolution altimétrique du capteur), leur distance à la source (altitude), leur amplitude (ou intensité de retour, maximum local du signal) et leur largeur [Blair *et al.*, 1999]. Ces deux dernières décrivent les propriétés de rétrodiffusion des cibles atteintes.

Même en négligeant les atténuations atmosphériques et en connaissant parfaitement la contribution du système, les techniques de déconvolution classiques du signal retour ne permettent pas l'obtention de ces propriétés [Jutzi et Stilla, 2006]. Par conséquent, différentes méthodes ont été mises au point pour traiter l'intégralité de l'onde retour :

- Approche par moindres carrés non linéaires avec utilisation de l'algorithme de Levenberg-Marquardt (partie 4.1),

- Classification non supervisée avec l'algorithme *Expectation-Maximization* (partie 4.2),
- Approche stochastique avec l'utilisation d'un algorithme de Monte-Carlo par Chaîne de Markov par sauts réversibles (partie 4.3).

Les deux premières méthodes choisissent de décomposer l'onde retour par une somme de fonctions prédéfinies majoritairement dans les articles une gaussienne. Il a en effet été montré que si la distribution altimétrique des éléments présents au niveau de l'empreinte au sol suit une loi gaussienne (statistiquement vérifié dans [Carabajal *et al.*, 1999]), l'onde réfléchie peut être approchée par l'estimation d'une somme de gaussiennes [Zwally *et al.*, 2002]. Il s'agit de l'approche la plus fréquemment utilisée pour traiter les données *full-waveform*. Néanmoins, d'autres fonctions ont été proposées dans [Chauve *et al.*, 2007] en vue d'améliorer la modélisation des ondes lidar et d'obtenir de nouveaux paramètres caractéristiques des cibles.

4.1. Approche par moindres carrés non linéaires

Hofton *et al.* [Hofton *et al.*, 2000] décrivent de manière complète cette méthodologie commune au lidar bathymétrique (LARSSEN 500 avec [Wong et Antoniou, 1991]), satellitaire (ICESAT avec [Brenner *et al.*, 2003]), aérien (LVIS [Hofton *et al.*, 2000], Riegl LMS-Q560 [Wagner *et al.*, 2006] ou TopEye MarkII [Reitberger *et al.*, 2006]) ou terrestre [Jutzi et Stilla, 2006].

Le principe est de décomposer l'onde retour sous la forme :

$$y_i = f_i(x) = \sum_{i=1}^n a_i e^{-\frac{(x-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}} + a_0 \quad (9)$$

où $\{\mu_i : i = 1, \dots, N\}$ est une séquence de points uniformément répartis et $\{y_i : k = 1, \dots, N\}$ leurs valeurs respectives. $y_i = f_i(x)$ est une courbe aux paramètres $\{a_i, \mu_i, \sigma_i\}$ (amplitude, position, demi-largeur *i.e.* écart type) pour $i = 1, \dots, n$. Il s'agit d'un système à N observations et $3n$ inconnues. On cherche à minimiser l'expression, pour une précision ϵ :

$$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (f(x_k) - y_k)^2} < \epsilon \quad (10)$$

Le système est résolu par moindres carrés non linéaires avec l'algorithme de Levenberg-Marquardt (LM) [Marquardt, 1969]. Un algorithme itératif est choisi car il n'existe pas d'algorithme permettant une résolution directe de ce problème [Hartley et Zisserman, 2000]. Une solution est acceptée si les résidus sont inférieurs à ϵ , fixé à $3\sigma_n$ par [Hofton *et al.*, 2000] avec σ_n l'écart type du bruit de fond des mesures.

L'algorithme est le suivant :

- **Identification a priori du nombre de gaussiennes.** Il est estimé à partir du nombre de points d'inflexion du signal. En pratique, on observe une sur-détection de points correspondant à du bruit résiduel. Les méthodes de détection d'échos en temps-réel décrites dans la partie 2.2.3 sont les plus souvent employées.

10. La forme gaussienne de l'impulsion provient des réflexions successives des photons au sein de la cavité laser (oscillateur) considérée comme un réseau de diffraction [Blair et Hofton, 1999]. Cette modélisation est toutefois assez simple : en réalité, la montée est raide et la descente plus lente.

- **Estimation des paramètres initiaux.** À partir de deux points d'inflexion consécutifs appartenant à la même gaussienne, Hofton *et al.* [Hofton *et al.*, 2000] estiment la position et la largeur des composantes gaussiennes par moyenne et demi-différence. [Reitberger *et al.*, 2006] appliquent un filtre gaussien au signal initial avant de seuiller la dérivée première pour focaliser la recherche des passages par zéro de la dérivée seconde.

- **Choix fin des gaussiennes.** Le nombre de contributions N est parfois sur-estimé à cause du bruit du signal. Si la largeur et l'amplitude des gaussiennes est suffisante (critère *a priori*), elles sont marquées comme « importantes ». Les autres sont numérotées en fonction de leur distance à une gaussienne « importante » (rang élevé = distance courte).

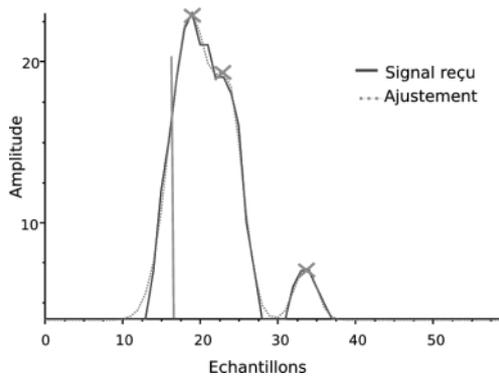
- **Optimisation des paramètres.** Seules les gaussiennes dites « importantes » sont estimées par l'algorithme de Levenberg-Marquardt.

- **Réitération des étapes précédentes.** Si l'erreur estimée ϵ est trop importante, il est possible d'ajouter une gaussienne « non importante » au processus (selon leur classement) ou de réestimer les paramètres initiaux puis relancer le processus d'optimisation.

4.2. Approche par maximum de vraisemblance

Persson *et al.* [Persson *et al.*, 2005] ont développé un algorithme de détection d'échos fondé sur l'algorithme EM (*Expectation-Maximization*) [Day, 1969]. Il permet d'estimer le nombre d'échos, leur amplitude ainsi que leurs largeurs respectives. Il s'agit d'une méthode d'apprentissage non supervisée où un modèle est ajusté aux observations et dont le problème majeur est la détermination du nombre de composantes qui décrit le mieux les données. Cette méthode est appliquée ici également avec la supposition que l'onde retour est générée à partir d'une somme de gaussiennes.

$$f(x) = \sum_{j=1}^{\hat{k}} p_j f_j(x) \tag{11}$$



(a) Détection de pics proches

avec $f_j(x) \in \mathcal{N}(\mu_j, \sigma_j^2)$, \hat{k} le nombre de gaussiennes, $f_j(x)$ la fonction de densité de probabilité gaussienne, p_j le poids relatif de $f_j(x)$, μ_j la distance et σ_j l'écart type de la gaussienne ajustée. L'algorithme 1 décrit les étapes de cette approche. Les paramètres en entrée sont le nombre maximum de gaussiennes que l'on peut avoir dans une impulsion, le nombre d'itérations maximal dans l'étape de maximisation des paramètres et la distance minimale entre deux échos (liée au capteur).

Algorithm 1 : Modélisation d'ondes lidar par une somme de gaussiennes : algorithme d'*Expectation-Maximization*

Notations : N , le nombre d'itérations maximum de l'algorithme,

\hat{k} , le nombre de gaussiennes réel,

K , le nombre maximum de gaussiennes fixé.

Entrées : $N = 30$, $K = 9$, mindist (*a priori*) = 0,75 m

Données : Une onde retour composée de S échantillons d'intensité N_i .

Sorties : $\forall j \in [1, k]$, $\{\mu_j, \sigma_j, p_j\}$ caractérisant chaque gaussienne.

1. Prétraitement par seuillage : élimination du bruit tout en conservant les faibles échos

2. Initialisation des trois paramètres : $\{\mu_j^0, \sigma_j^0, p_j^0\}$

pour chaque $j \in [1, k]$ **faire**

$\sigma_j^0 = 2$

$p_j^0 = p_{j'}^0$ avec $j' \in [1, k]$

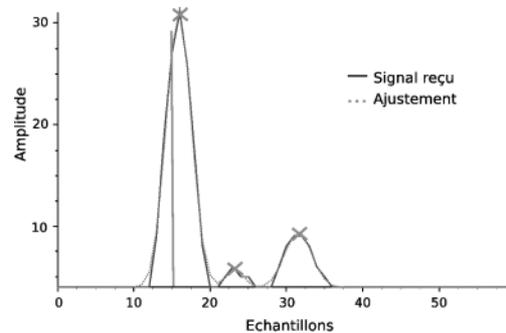
μ_j^0 un maximum local du signal filtré

3. Étape d'estimation. Une hypothèse de maximum de vraisemblance est calculée supposant que la valeur prise par chaque variable est la valeur calculée ici.

pour chaque $i \in [1, S]$ **faire**

$$Q_{ij} = \frac{p_j f_j(i)}{\sum_{j=1}^k p_j f_j(i)}$$

(Q_{ij} est la probabilité que l'échantillon i appartienne à la composante j , k le nombre de composantes ajustées à l'onde retour)



(b) Détection de pics de faible intensité

Figure 5. Deux exemples d'amélioration de la détection de points dans des ondes lidar. (a) Trois pics sont détectés dont deux se chevauchent. (b) Trois pics sont détectés dont deux de faible amplitude. Pour les deux cas, seul un écho, signalé par la barre verticale, est trouvé par un système temps-réel. Les croix signalent les positions des pics détectés par post-traitement.

4. Étape de maximisation

Tant que $n \geq N$ faire

pour chaque $j \in [1, k]$ faire

$$p_j = \frac{\sum_{i=1}^S N_i Q_{ij}}{\sum_{i=1}^S N_i};$$

$$\mu_j = \frac{\sum_{i=1}^S N_i Q_{ij} i}{p_j \sum_{i=1}^S N_i};$$

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^S N_i Q_{ij} (i - \mu_j)^2}{p_j \sum_{i=1}^S N_i}};$$

$$Q_{ij}^{(n+1)} \leftarrow Q_{ij}^{(n)};$$

+ + n ;

5. Estimation du nombre de composantes \hat{k} (critère AIC)

$$\hat{k} = \underset{k}{\operatorname{argmin}} (\log(V_s(k)) + \frac{2k}{S})$$

$$\text{où } V_s(k) = \frac{1}{S} : \sum_{i=1}^S (y_i - \hat{y}_i)^2$$

4.3. Méthode de type Monte Carlo par Chaînes de Markov

Hernández-Marín *et al.* [Hernández-Marín *et al.*, 2007] proposent une méthodologie générale pour la caractérisation de surfaces atteintes par un faisceau laser. Ils considèrent le problème de la manière suivante : l'analyse d'un histogramme de photons comptés ou d'intensité intégrée sur le temps peut permettre de trouver le nombre, la position et l'amplitude des rétrodiffusions des surfaces cibles.

Une méthodologie de Monte-Carlo par Chaîne de Markov (MCMC) puis par sauts réversibles (RJCMC – *Reversible Jump Monte Carlo Markov Chain*) est utilisée. La combinaison des deux méthodologies permet des sauts entre des modèles de dimensions différentes et des sauts à l'intérieur de modèles à dimension fixe. Le cadre bayésien de la méthode proposée a pour avantage la facilité de mise à jour des connaissances et d'intégration d'informations *a priori* sur la surface rétrodiffusante [Green, 1995].

Les histogrammes d'intensité sont modélisés par une série de quatre fonctions exponentielles :

$$f_{\text{hist}}(i, p) = \beta \cdot \begin{cases} \exp\left(-\frac{(i_1 - i_0)^2}{2\sigma^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{i - i_1}{\tau_1}\right) & i < i_1 \\ \exp\left(-\frac{(i - i_0)^2}{2\sigma^2}\right) & i_1 \leq i < i_2 \\ \exp\left(-\frac{(i_2 - i_0)^2}{2\sigma^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{i - i_2}{\tau_2}\right) & i_2 \leq i < i_3 \\ \exp\left(-\frac{(i_1 - i_0)^2}{2\sigma^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{i_3 - i_2}{\tau_2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{i - i_3}{\tau_3}\right) & i \geq i_3 \end{cases} \quad (12)$$

où β est un facteur d'amplitude, i_0 le temps du pic maximal, i_1 , i_2 et i_3 les points auxquels le modèle change de fonction et \mathbf{p} le jeu de paramètres suivant $(\beta, \sigma, i_0, i_1, i_2, i_3, \tau_1, \tau_2, \tau_3)$. Alors, l'histogramme de comptage des photons (*i.e.* le signal) $F(i, k, \theta_{\text{photons}})$ peut être modélisé par :

$$F(i, k, \theta_{\text{photons}}) = \sum_{j=1}^k f_{\text{hist}}(i, \mathbf{p}_j) + B \quad (13)$$

avec k le nombre de pics, B le bruit de fond des mesures et $\theta_{\text{photons}} = \{\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_k, B\} \in \mathbb{R}^9 \times \mathbb{N}^k$.

Une distribution *a priori* puis une fonction de vraisemblance sont formulées pour décrire l'inférence bayésienne de la distribution de la cible sur les inconnues k et θ_{photons} . Les différents paramètres sont alors définis par différentes distributions uniformes :

$$k \sim \mathcal{U}(1, k_{\text{max}})$$

$$\beta_j \sim \mathcal{U}(0, \max(x_1, x_2, \dots, x_{i_{\text{max}}})) \quad x_i \text{ le nombre de photons}$$

$$i_{0j} \sim \mathcal{U}(1, i_{\text{max}}) \quad (14)$$

$$B \sim \mathcal{U}\left(0, \left(\frac{1}{i_{\text{max}}}\right) \sum_{i=1}^{i_{\text{max}}} x_i\right)$$

permettant la modélisation de la distribution *a priori* intégrale suivante :

$$f(k, \theta) = f_3(B) f_4(k) \prod_{n=1}^k f_1(\beta_n) f_2(i_{0n}) \quad (15)$$

avec $f_{r=\{1,2,3,4\}}(\cdot)$, la fonction de densité de probabilité uniforme, composition des distributions définies dans l'équation 14. Il est alors possible de formuler la fonction de vraisemblance $L(x|k, \theta)$ puis la distribution de la cible :

$$\pi(k, \theta|x) = \frac{L(x|k, \theta) f(k, \theta)}{\int L(x|k, \theta) f(k, \theta) d(k, \theta)} \propto L(x|k, \theta) f(k, \theta) \quad (16)$$

Ensuite, l'approche RJCMC est adoptée, permettant tout d'abord une mise à jour des paramètres Φ en fonction du nombre de pics supposés. L'espace des solutions est un ensemble fini de sous-espaces de dimensions variables c'est pourquoi les algorithmes standards de MCMC ne sont pas applicables mais l'approche RJCMC possible [Richardson et Green, 1997].

Les différents mouvements possibles sont la mise à jour des paramètres, la naissance ou mort d'un pic ou la séparation d'un pic en deux ou la fusion de deux en un seul. L'approche RJCMC agit de la sorte : nous avons une famille finie de mouvements \mathcal{M} possibles, indexée par $m \in \mathbb{Z}^+$ (ici, $m = \{1, 2, 3\}$). L'état courant du jeu de paramètres est (k, θ) . Alors on propose un mouvement de type m vers l'espace d'état (k', θ') guidé par un noyau de proposition donné $q_m(k, \theta, k', \theta')$. Le mouvement est accepté selon la probabilité $\alpha_m(k, \theta, k', \theta')$ donnée par :

$$\alpha_m(k, \theta, k', \theta') = \min\left(1, \frac{\pi(k', \theta'|x)}{\pi(k, \theta|x)} \times \frac{q_m(k', \theta', k, \theta)}{q_m(k, \theta, k', \theta')}\right) \quad (17)$$

Au final, cela permet d'inférer le bon nombre de pics, leur amplitude et leur position sans connaissance *a priori* de la dimension de l'espace des paramètres et en étant robuste au bruit.

En conclusion, l'utilisation d'un algorithme de type MCMC est pertinente pour sa robustesse et l'absence de paramètres à régler. Cependant, l'objection que l'on peut faire est que l'utilisation des champs de Markov a un coût de calcul relatif à l'algorithme permettant de calculer les estimateurs des processus recherchés. Les temps de calcul peuvent donc s'avérer très longs.

4.4. Résultats

De manière générale les trois techniques évoqués précédemment ne limitent pas le nombre de pics trouvés dans les signaux lidar.

Pour les méthodes d'ajustement de signaux par Moindres Carrés et Expectation-Maximization, les résultats sont jugés « bons » en regard des applications envisagées. Le post-traitement offre ainsi une meilleure estimation de la hauteur des cibles rencontrées et du sol, en particulier sur des terrains complexes [Zwally *et al.*, 2002], ainsi qu'une meilleure précision

que les systèmes temps-réel embarqués. Ainsi, séparer deux échos se chevauchant légèrement est désormais possible (*cf.* figure 5) et ceci jusqu'à une distance de moins de 0,5 m [Hug *et al.*, 2004]. Les pics de faible amplitude sont désormais également détectés. Les figures 6 et 7 fournissent des illustrations d'échos supplémentaires extraits d'une part sur un profil et d'autre part sur différents types d'arbres. Elle illustrent les potentialités des capteurs à petite empreinte en milieu forestier. Dans [Stilla *et al.*, 2007], il est montré qu'il est possible de détecter des échos faibles correspondant à des cibles partiellement cachées. Pour cela, des relations de voisinages entre ondes successives sont établies et les informations mutuelles comprises dans ces ondes sont accumulées pour mettre en relief (ou non) une réponse synthétique de ces cibles. Le traitement du signal se fait alors sur une réponse moyennée spatialement. L'approximation gaussienne de la réponse du système n'est pas toujours vérifiée mais elle convient pour la plupart des applications. Wagner *et al.* [Wagner *et al.*, 2006] signalent par ailleurs que l'ajustement des échos à des gaussiennes est moins bon pour les fortes amplitudes. De plus, aux faibles amplitudes, l'es-

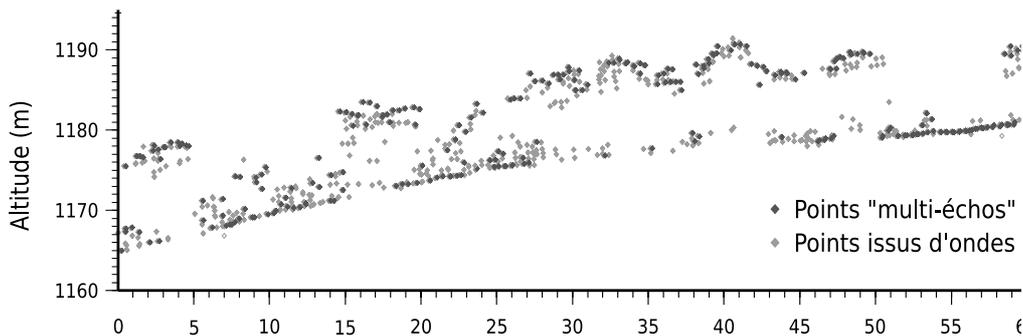


Figure 6. Points supplémentaires extraits sur une zone de végétation par traitement a posteriori des ondes lidar par rapport à un nuage de points multi-échos.

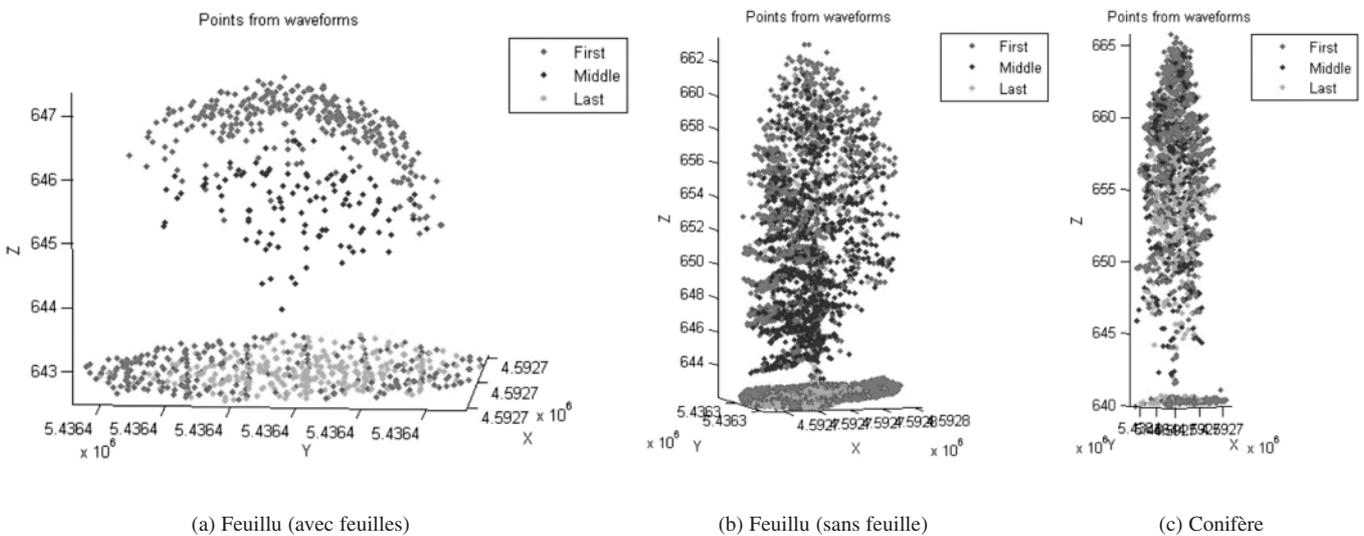


Figure 7. Quelques exemples de points laser sur différents types d'arbres, extraits par traitement a posteriori des données FW (système TopEye MarkII). Les points rouges, verts et bleus correspondent respectivement au premier écho, au dernier et à tous les échos intermédiaires [Reitberger *et al.*, 2006].

timisation des paramètres des échos est moins fiable alors qu'elle est robuste pour les fortes. En outre, le choix d'une décomposition du signal en somme de gaussiennes, connaissant la complexité des formes, des propriétés de réflexion des objets naturels ou non et la variation d'intensité du faisceau dans la tache de diffraction, n'est parfois pas suffisante. Les échos obtenus peuvent ne pas être symétriques ou être symétriques et déformés (aplatis ou piqués). Les résultats présentés dans [Chauve *et al.*, 2007] montrent que le choix d'autres fonctions modèles pour l'ajustement des signaux est pertinent. En particulier, l'utilisation de fonctions dérivées de la gaussienne, telle que la gaussienne généralisée, permet de mieux estimer les composantes du signal.

L'utilisation des techniques de Levenberg-Marquardt ou d'Expectation-Maximization autorisent un changement facile de la nature de la distribution de la réponse impulsionnelle du système. Néanmoins, si l'on souhaite modéliser les ondes lidar par des fonctions plus complexes, ces méthodes vont faillir dans l'étape d'optimisation (dérivées non calculables). La méthode par RJMCMC paraît alors la plus appropriée pour les études futures sur le traitement des signaux lidar.

S

5. Analyse quantitative des ondes retour

La distribution 3D de cibles présentes dans le cône de diffraction laser module le signal retour. Cette forme complexe contient donc des informations significatives sur la rugosité, la pente et la réflectivité des surfaces présentes dans ce cône. Dans le cadre de l'analyse de données FW pour la classification de scènes, il s'agit d'étudier les corrélations entre la forme de l'onde retour et les paramètres physiques, géométriques et radiométriques, des cibles rencontrées.

De nombreux travaux ont déjà été menés afin d'évaluer l'influence de paramètres d'émission et de rétrodiffusion du signal sur la forme de l'onde retour numérisée. Ils sont décrits dans ce chapitre. Les travaux sur la calibration de système laser sont également évoqués car cette tâche a également pour objectif de rendre significative et interprétable la mesure d'intensité laser.

5.1. Comportement d'une onde rétrodiffusée

Un certain nombre de facteurs pouvant influencer la forme du signal retour ont été étudiés :

- **Distance au capteur et angle d'émission :** Vandapel *et al.* [Vandapel *et al.*, 2004] se sont intéressés à l'analyse de la forme de l'onde retour pour l'interprétation de scènes terrestres. Il a testé pour cela différentes configurations en distance et en angle d'un capteur conçu dans leur laboratoire. À incidence normale,

sur une surface blanche, l'intensité du retour suit une loi en $\frac{1}{r^2}$ (r , distance à la cible). À faible distance de la cible, le pic est asymétrique avec une montée lente et une brusque descente. Il devient symétrique avec l'augmentation de la distance. Ensuite, des variations de forme sont notées avec des changements d'angle d'incidence. Plus l'angle décroît, plus le pic devient fin et symétrique. Il n'est toutefois pas possible de retrouver l'angle d'émission du faisceau sans une connaissance précise de la surface atteinte, ce qui n'est pas le cas en pratique.

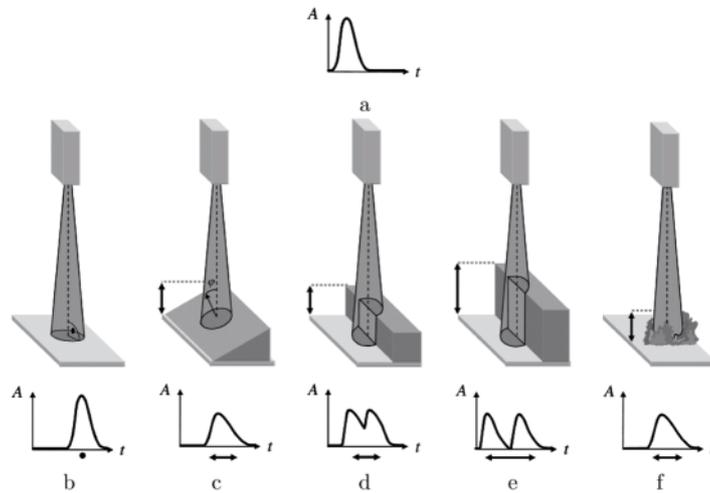
- **Rugosité de la surface atteinte :** des réponses différentes sont constatées entre surfaces lisses (un voire deux échos si discontinuités) et poreuses (multiples échos à différentes profondeurs, équivalent au comportement des arbres et de la végétation) [Vandapel *et al.*, 2004].

- **Couleur de la cible :** une simulation a été menée par [Vandapel *et al.*, 2004] sur une surface plane avec des couleurs différentes. Une variation de la localisation voire une suppression (pour le noir) des pics est remarquée en fonction de la couleur et certaines variations de la forme du signal restent inexplicables (cas de la couleur rouge, figure 8 (b)).

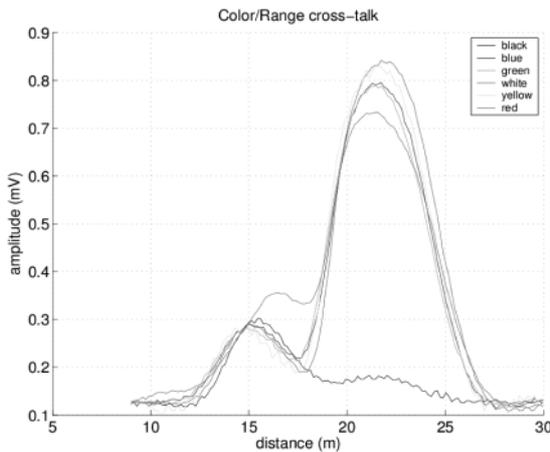
- **Géométrie de la cible :** le FOI (Institut de Recherche du Ministère de la Défense suédoise) a proposé un modèle complet de simulation de données laser. Il modélise les caractéristiques du capteur, la géométrie et la réflectivité des cibles, l'atténuation atmosphérique... Steinvall [Steinvall, 2000] et Carlsson [Carlsson *et al.*, 2001] ont mené des expériences sur des cibles aux formes simples (plans, marches, coins de cubes, objets de rotation) pour étudier l'influence combinée de la géométrie et de la section efficace des cibles sur l'onde retour. La variation de la pente d'une surface plane à réflectance unique conduit à un élargissement de l'impulsion et à une baisse de son amplitude, pouvant conduire à une mauvaise estimation de la distance en particulier à incidence autre que normale (figure 8(c)). Une similitude de réponse entre une surface plane et un coin de cube (deux plans orthogonaux) est en outre observée. Deux surfaces planes peuvent ainsi être assimilées en une seule. Enfin, des simulations ont été menées sur une surface en forme de « marches » : si les surfaces sont suffisamment écartées pour séparer les deux échos retour, la distinction sera possible. La figure 8(a) illustre les variations théoriques de l'onde retour en fonction de la géométrie d'incidence au sein du cône de diffraction laser.

La comparaison des ondes retour réfléchies par diverses formes montre au final le potentiel de la classification d'objets par analyse de l'onde à partir d'une unique impulsion. Il faut toutefois préciser que ces conclusions ont été obtenues en supposant une diffusion des cibles lambertienne, ce qui est une hypothèse forte.

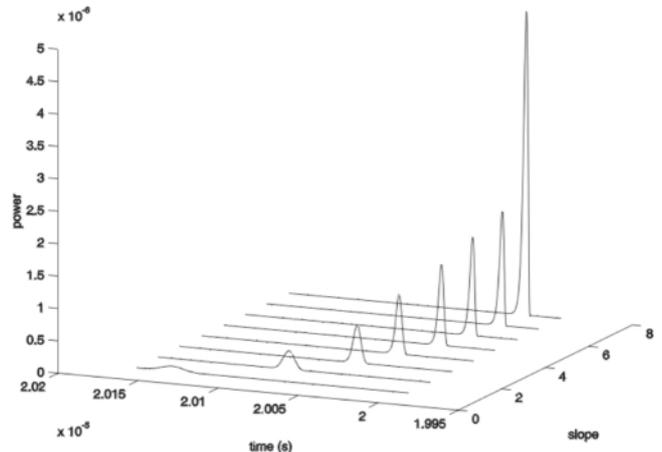
- **Combinaison de la géométrie et de la réflectance :** Jutzi *et al.* [Jutzi et Stilla, 2003a] ont mis en place des processus expérimentaux afin d'évaluer l'influence de différents matériaux urbains sur la forme de l'onde rétrodiffusée. Des images d'intensité, de distance et de largeur de pics sont calculées (figu-



(a) Variations de la forme de l'onde retour en fonction de la géométrie d'incidente: a) onde émise; b) surface plane; c) surface à faible pente; d) deux objets avec une faible différence d'altitude; e) deux objets avec une forte différence d'altitude; f) petits objets distribués aléatoirement [Jutzi et Stilla, 2006].



(b) Variation selon la couleur d'une surface atteinte à incidence normale [Vandapel *et al.*, 2004]



(c) Échos retour pour huit surfaces de pente de plus en plus forte (du fond vers le devant de l'image) [Carlsson *et al.*, 2001]

Figure 8. Quelques facteurs d'influence de la forme d'une onde retour laser.

re 9). Les quatre types de matériaux testés ont tous des comportements différents. Cela confirme le fait qu'il n'est pas possible de classer simplement des formes d'onde en végétation/bâti/routes puisque des réponses similaires ont été constatées entre objets de classes différentes et des écarts notables au sein d'une même classe. Ces travaux sont assez similaires à ceux évoqués par exemple dans [Lachérade *et al.*, 2005] sur l'étude de la variation de réflectance de divers matériaux urbains (asphalte, goudron, béton, granit...) à partir d'images aériennes haute résolution.

- **Autres facteurs :** Carlsson et Steinvall [Carlsson *et al.*, 2001], en se basant sur leur modèle, ont constaté que les effets atmosphériques et spéculaires de la cible sur la mesure de distance sont négligeables par rapport aux autres effets.

5.2. Classification des échos

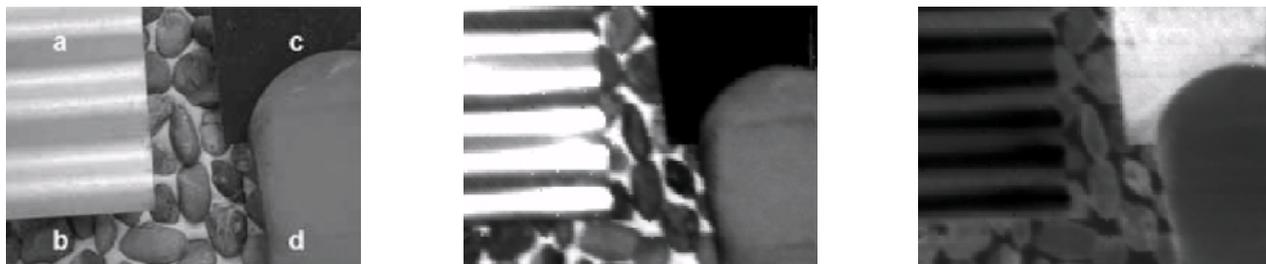
Aucune étude sur la classification des données *full-waveform* n'a pour l'instant choisi de conserver l'intégralité de l'onde pour ne pas perdre d'informations. Seuls des travaux sur les échos extraits de ces signaux et des paramètres de forme associés ont été menés.

Un affichage simple en fonction des attributs des pics estimés est possible mais ne permet ni une interprétation simple (voir figure 10) ni de définir une signature caractéristique pour chaque objet. On constate un élargissement de l'écho sur la canopée des arbres ou sur les champs labourés par rapport à la route et aux zones de prairies, une forte amplitude sur l'herbe, les routes goudronnées, une variable sur les toits de bâtiments,

en fonction des matériaux (figure 11). De plus, les faibles échos sont plus larges et les points additionnels extraits ont une intensité plus faible que les premiers échos.

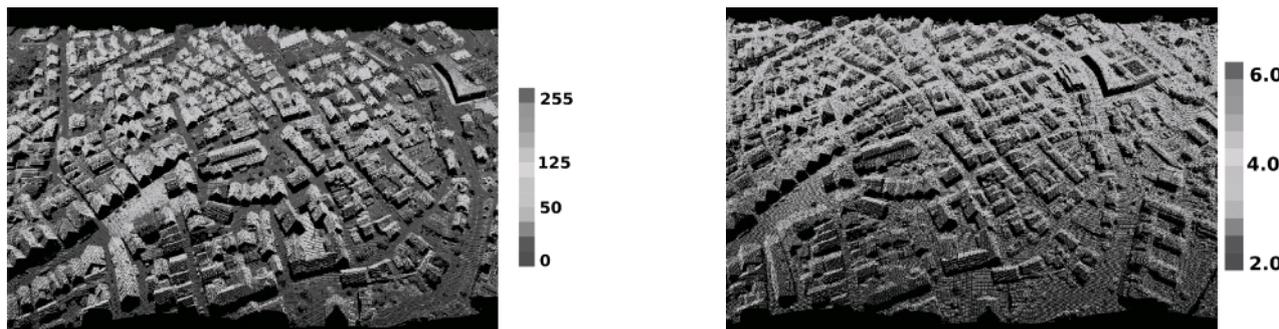
Cependant, on ne peut catégoriquement classer un nuage de points obtenu en fonction des paramètres extraits par analyse de l'influence « théorique » des facteurs décrits dans la partie 5.1. Deux surfaces (parallèles ou en angle) peuvent avoir la même

signature qu'une surface plane. Un écho large et de faible amplitude n'appartient pas forcément à la végétation car la forme des houppiers est un paramètre primordial. Les routes et les toits des bâtiments ont des matériaux variables et donc des signatures variables, parfois similaires à des objets naturels [Gross *et al.*, 2007]. Ainsi, des méthodes de classification simples, par exemple par arbre de décision conduisent à un



(a) Matériaux urbains testés. *a*) tôle ondulée, *b*) galets, *c*) ardoise (angle de 33°), *d*) tuile de toit plate.
 (b) Image d'intensité des échos (noir – faible – → blanc – fort écho –)
 (c) Image de largeur des échos (*idem*)

Figure 9. Influence de matériaux urbains sur la forme des échos détectés [Jutzi et Stilla, 2003].



(a) Amplitude (b) Écart-type (ns)

Figure 10. Affichage des paramètres extraits d'une décomposition du signal retour en gaussiennes sur une zone urbaine avec présence de végétation.

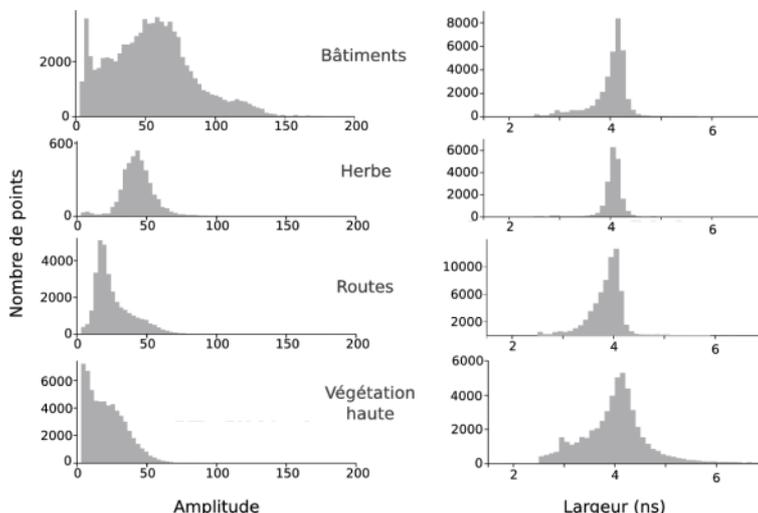


Figure 11. Histogramme de l'amplitude et de la largeur des échos pour différentes classes d'objets.

important taux de mauvaise classification [Ducic *et al.*, 2006]. Gross *et al.* [Gross *et al.*, 2007] proposent une méthode plus performante de discrimination des zones de végétation en se basant en particulier sur les valeurs propres extraites de la matrice de variance-covariance des valeurs d'intensité calculée sur un environnement cylindrique. Une classification supervisée par Séparateurs à Vaste Marge (SVM) est présentée dans [Mallet *et al.*, 2008] et montre qu'il est possible, en milieu urbain, de segmenter les zones de végétation, de bâtiments et de sol en utilisant les paramètres extraits de l'étape de traitement du signal et des critères lidar plus communs.

En réalité, pour utiliser les valeurs d'intensité et la largeur des échos extraits, il ne faut pas oublier qu'une correction de l'angle d'incidence du faisceau laser et de l'orientation de la surface sont nécessaires. Une étape de simulation de signaux lidar est également nécessaire pour comprendre les influences spécifiques des caractéristiques des cibles sur la forme des ondes. En conséquence, il est encore difficile de quantifier spécifiquement l'influence de la géométrie et de la réflectance d'une cible sur la forme du signal retour. Quand les informations sont corrélées (cas réels), cela est encore moins évident.

Les systèmes laser large empreinte peuvent toutefois permettre des classifications simples globales. Ainsi, le satellite ICESat fournit une classification embarquée avec son capteur GLAS quasi instantanée des paysages survolés à partir de l'analyse statistique de l'onde réfléchie [Brenner *et al.*, 2003]. Les signaux retour sont approchés par une somme de gaussiennes et traités comme décrits dans la partie 4.1. Les paramètres extraits sont comparés à des réponses théoriques statistiquement représentatives des surfaces à classer obtenues par observations de réponses réelles de signaux laser. Le signal est alors classé en terre, banquise, océan ou glace de mer. Une telle classification est possible car le capteur GLAS est un système à large empreinte (70 m). Le signal retour est une réponse moyennée des surfaces atteintes et ne prend donc pas en compte les disparités locales.

5.3. Calibrage de données d'intensité laser

L'intensité du signal retour est caractéristique de la réflectance des surfaces diffusantes. À l'heure actuelle, les intensités fournies par les laser commerciaux ne sont pas calibrées et varient d'un système à l'autre pour un même matériau. Peu d'études ont été menées jusqu'alors sur la calibration des systèmes laser. Le Finnish Geodetic Institute (FGI) est le seul à proposer des méthodes de calibrage d'intensité de scanners laser.

Tout d'abord, le FGI dispose de cibles calibrées portatives à des réflectances données pour étudier l'influence de l'albédo sur la forme de l'onde retour et les propriétés directionnelles de celles-ci [Kaasalainen *et al.*, 2005]. Les résultats montrent que la réflectance joue un rôle prépondérant sur la valeur et la largeur du pic d'intensité sans toutefois discriminer l'influence de l'albédo des autres caractéristiques des cibles. Cependant, le

protocole de calibrage, qui prend en compte également une faible variation de l'angle de visée pour éliminer l'effet de *hot-spot*, permet l'utilisation de l'intensité comme une information à part entière. Une étude a été menée en laboratoire sur différentes cibles pour évaluer les informations extraites par mesure de l'intensité laser. Son but est de mesurer la réflectance des sols et de développer une méthode de calibrage à des fins de classification automatique. Les matériaux testés sont par exemple du sable avec diverses tailles de grain, des asphaltes, des arbres, du lichen et de la mousse avec de faibles variations d'angle. La calibration est possible mais il s'avère difficile d'établir une classification fiable en différentes composantes en ne se fondant que sur les caractéristiques d'intensité dont les propriétés des pics varient de manière ambiguë et les effets de rétrodiffusion sont encore mal connus. Les auteurs préconisent l'étude d'échantillons beaucoup plus grands pour espérer établir une première méthodologie de classification.

Par ailleurs, Ahokas *et al.* [Ahokas *et al.*, 2006] démontrent la forte corrélation entre réflectance des surfaces et intensité quelque soit la hauteur de vol. Pour cela, la valeur d'intensité doit être corrigée selon la distance de scannage, l'angle d'incidence, la transmission atmosphérique, l'atténuation et la puissance transmise par le système. Certaines hauteurs de vol sont préférées (entre 200 et 1000 m) pour une tache au sol convenable, tout comme des angles de visée inférieurs à 10°.

5.4. Applications au milieu forestier

L'objectif d'une cartographie et d'une analyse des milieux forestiers par télédétection est double : outre la volonté d'inventaire, il s'agit d'aider à la gestion des ressources naturelles à échelles variables dans une thématique de développement durable, de gestion des écosystèmes et, d'autre part, d'un soutien indispensable dans les politiques de prévention des risques naturels. Cette thématique est très largement abordée en imagerie. De nombreux processus automatiques ont été développés en vue de remplacer les travaux de recensement terrain ou de photo-interprétation. Les méthodologies existantes sont nombreuses pour détecter et délimiter les houppiers en zones forestières [Pollock, 96 ; Pouliot *et al.*, 2002 ; Perrin, 2006].

Les lidar FW ont été conçus pour l'analyse en profondeur des structures végétales. En densifiant les nuages de points 3D dans la canopée, ils sont alors utilisés pour estimer des paramètres forestiers. Cette thématique concentre la majorité de la littérature *full-waveform*.

5.4.1. Estimation de paramètres forestiers

Les travaux sur l'estimation de ces paramètres à partir de données lidar multi-échos sont déjà nombreux : pour des lidar petite empreinte (haute densité de points), de nombreuses études existent visant à extraire les arbres à l'échelle de la parcelle, leur hauteur et leur diamètre de couronne, leur volume [Naesset,



1997], d'essayer de les classer selon les espèces [Holmgren et Persson, 2004], d'estimer leurs caractéristiques propres [Andersen *et al.*, 2005] voire même de mesurer la croissance de la forêt et de détecter des arbres coupés [Yu *et al.*, 2004]. Il ne s'agit toutefois pas d'approches générales : elles dépendent fortement des données lidar en entrée et du type d'espèce. Seule la hauteur des arbres est une mesure fiable. Pour des canopées denses et élevées, on atteint le sol et les sommets des arbres avec des systèmes à large empreinte. L'estimation de paramètres forestiers se fait alors à grande échelle : densité de peuplement, taux de couvert, biomasse... [Means *et al.*, 1999].

Pour une végétation de feuillus, des relevés hivernaux (contexte dit de *leaf-off*) permettent une restitution directe de la structure interne de la canopée et sont appréciés.

[Lefsky *et al.*, 2002 ; Lim *et al.*, 2003 ; Reutebuch *et al.*, 2005] présentent les principaux travaux et méthodes en laser aéroporté ME et FW pour les sciences forestières.

Les paramètres suivants sont estimables ou déductibles à partir de données *full-wave* :

- **Hauteur de la canopée** : mesure directe de la différence entre les hauteurs des premier et dernier échos, sur tous types de forêts (tempérée, boréale ou tropicale) [Weishampel *et al.*, 2000 ; Kimes *et al.*, 2006], généralement sous-estimée de plusieurs dizaines de centimètres.

- **Distribution verticale de la canopée** : mesure directe [Dubayah et Blair, 2000] fondamentale pour estimer d'autres descripteurs de la canopée comme la biomasse au sol, prédire l'état de la forêt [Dubayah *et al.*, 1997] et établir l'âge d'une plantation.

- **Profil de hauteur de canopée** : mesure plus détaillée dérivée directement de la précédente, pour toute forêt de feuillus. Il

permet de connaître le taux d'occlusion d'une plantation (figure 12) [Harding *et al.*, 2001].

- **Couverture de la canopée** : elle s'obtient directement. Il s'agit de la fraction d'énergie renvoyée par la cible corrigée par la réflectance estimée du sol [Means *et al.*, 1999].

- **Profil de volume de la canopée** : il est obtenu par modélisation et permet de traduire les différences qualitatives et quantitatives entre différents âges d'une même espèce. Une connaissance des profils foliaires verticaux est également possible [Harding *et al.*, 2001].

- **Biomasse au dessus du sol** : modélisée à partir des mesures de hauteur d'arbres. Cette corrélation a été mise en évidence sur des zones mixtes conifères/feuillus, en zone de montagne, en forêts boréales et tropicales denses [Lefsky *et al.*, 1999 ; Means *et al.*, 1999 ; Drake *et al.*, 2002 ; Hyde *et al.*, 2005].

- **Surface terrière** : superficie de la section transversale de la tige, à hauteur de poitrine (soit environ 1,37m) [Lefsky *et al.*, 1999 ; Means *et al.*, 1999].

- **Diamètre moyen des arbres et volume de couronne de bois** [Popescu *et al.*, 2003 ; Zimble *et al.*, 2003].

- **Fermeture du couvert** : degré de réduction progressive de l'espace libre entre cimes [Naesset et Økland, 2002].

- **Autres paramètres** : la densité des principaux arbres peut être inférée. Le LAI (*Leaf Area Index*) ou la connaissance d'essences nécessitent l'ajout de données autres (thermiques, optiques, radar) pour une bonne estimation. La classification d'espèces semble possible [Reitberger *et al.*, 2006] mais aucun algorithme fiable n'a encore été mise en oeuvre.

Les paramètres directement mesurables à partir des données lidar ne sont toutefois pas toujours obtenus ou peuvent l'être de manière imprécise. De plus, certaines variables sont obtenues

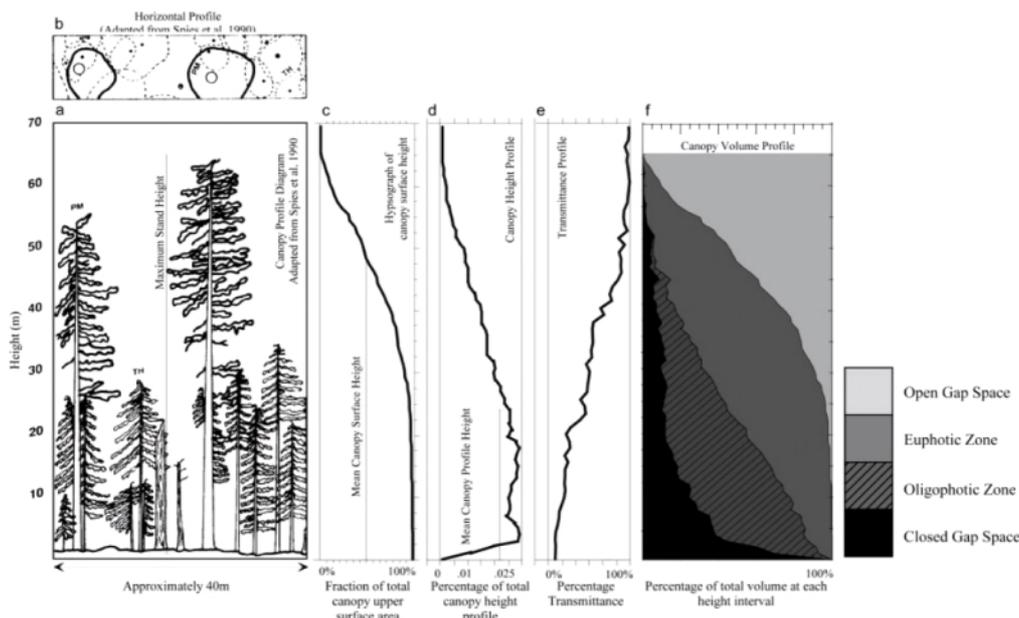


Figure 12. Comparaison de trois méthodes de description de la canopée. a) et b) montrent les zones d'étude, c) la distribution verticale de la surface haute de la canopée, d) le CHP, e) le profil vertical de transmittance et f) le CVP montrent la distribution verticale en quatre classes dans la canopée, selon la couverture de la canopée [Lefsky *et al.*, 2002].

par des formules empiriques et varient donc selon les types de forêts et leurs caractéristiques principales [Popescu *et al.*, 2003 ; Hyde *et al.*, 2005]. Il est par conséquent difficile d'obtenir de manière précise et exhaustive les paramètres fondamentaux des peuplements d'arbres (hauteur et volume de couronne), ceux qui en découlent ainsi que des relations générales entre variables structurales forestières sur un même type de biome (et *a fortiori* sur tous types).

5.4.2. Modélisation de zones forestières

Blair et Hofton [Blair et Hofton, 1999] offrent l'un des premiers développements méthodologiques concernant la modélisation de scènes forestières en simulant des données FW. Ils effectuent une simulation de l'onde retour par décomposition de la surface touchée en n petites surfaces aux caractéristiques d'intensité propres, mais de même réflectivité (cas typique de forêts denses). Une forte corrélation entre ces données et celles issues du capteur LVIS est mise en valeur semblant prouver que les effets non modélisés comme les multiples rétrodiffusions et la cohérence entre sources ne sont pas des contributeurs significatifs à la forme de l'onde retour.

Sun et Ranson [Sun et Ranson, 2000] proposent un modèle plus complet liant des données *full-waveform* à la structure spatiale et aux propriétés optiques de la végétation. Ils simulent en particulier une forêt où chaque arbre est paramétrable par sa hauteur, son espèce et son diamètre maximal (*cf.* figure 13). Leur modèle 3D intègre également d'autres données terrain, conditions édaphiques et autres paramètres écologiques limitants. Les simulations de retours d'ondes sont alors menées de la sorte : la scène 3D est divisée en petites cellules. La canopée est divisée en m couches C_j d'épaisseur Δz . L'altitude z vaut 0 en haut de la canopée et augmente en pénétrant dedans. L'impulsion lidar est divisée en n sous-échos L_i de durée $\Delta t = \frac{2\Delta z}{c}$. Le signal retour est alors établi suivant :

$$L(i, j) = L_i R_j E_{j-1} \quad (18)$$

où L_i est le $i^{\text{ème}}$ sous-écho, R_j la rétrodiffusion d'une cellule au $j^{\text{ème}}$ niveau de la canopée (fonction des caractéristiques réfléchissantes de la surface foliaire) et E_{j-1} l'extinction sous la cellule j (dépendant également de la surface foliaire réfléchissante moyenne et de la densité de feuilles. En fonction de la position de chaque colonne à l'intérieur de la tache au sol, chaque $L(i, j)$ est pondéré, puis l'intensité lidar retour total de chaque couche i est obtenue par sommation de ces contributions. Des données *full waveform* sont alors simulées avec différentes espèces d'arbres, à différents âges puis comparées à des données terrain et SLICER. Les simulations montrent que le modèle permet de retrouver les formes principales de la signature lidar et que le signal lidar fournit une indication à la fois sur les structures horizontale et verticale des peuplements forestiers. L'âge et l'espèce des arbres influent considérablement sur la forme de l'onde retour.

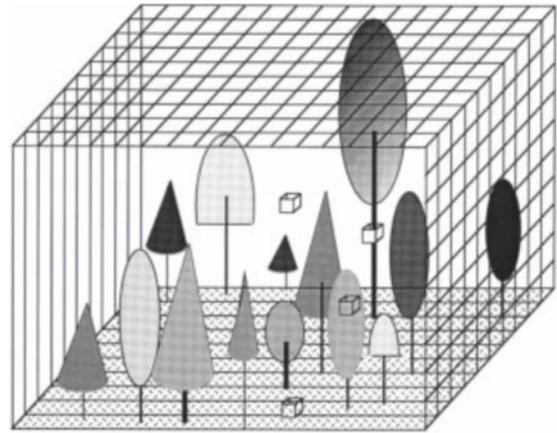


Figure 13. Modèle 3D d'un peuplement forestier. Des paramètres forestiers peuvent être modélisés dans chaque cellule du modèle.

Une étude différente de la relation entre onde et paramètres de structure de la canopée est proposée par [NiMeister *et al.*, 2001]. Elle prend en compte les effets d'arrangement de la structure sur cette relation pour retrouver les paramètres 3D de végétation. Il s'agit d'une adaptation au lidar d'un modèle hybride de transfert radiatif et d'optique géométrique, nommé GORT, pour décrire les effets de ces paramètres sur l'environnement de radiation.

GORT sert à décrire le *full-waveform* comme une fonction des paramètres de canopée, ce qui est validé avec des données SLICER. À partir de l'équation lidar, il est possible de retrouver la probabilité qu'il n'y ait pas de feuilles sous une hauteur z de la canopée $P(z)$ ainsi que le profil foliaire apparent. Nous pouvons lier directement $P(z)$ à l'énergie laser retour avec les équations lidar suivantes :

$$-\frac{dR_v(z)}{dz} = J_0 \rho_v \frac{dP(z)}{dz} \quad (19)$$

$$R_g = J_0 \rho_g P(0) \quad (20)$$

avec : $\frac{dR_v(z)}{dz}$ la densité d'énergie lidar retour dans la couche de canopée à l'altitude z , J_0 l'énergie émise par le système, obtenue par calibrage. $R_v(z)$, $R_v(0)$ et R_g sont les énergies retour du lidar respectivement du haut de la canopée à la hauteur z , du haut de la canopée au sol et du sol uniquement. ρ_g est le coefficient de rétrodiffusion du sol et ρ_v le coefficient volumique d'un élément foliaire de la canopée. Le rapport $\frac{\rho_v}{\rho_g}$ apporte donc des informations sur la rétrodiffusion des feuilles, leur orientation et la réflectance des sols. Par combinaison des équations 19 et 20, on obtient :

$$P(z) = 1 - \frac{R_v(z)}{R_v(0)} \frac{1}{1 + \frac{\rho_v}{\rho_g} \frac{R_g}{R_v(0)}} \quad (21)$$

Les rapports $\frac{R_v(z)}{R_v(0)}$ et $\frac{R_g}{R_v(0)}$ sont calculables à partir de l'onde retour et avec la connaissance de $\frac{\rho_v}{\rho_g}$, $P(z)$ peut être obtenu aisément, et ceci sans calibrage (J_0 ayant été éliminé lors de la résolution du système).

D'autre part, une formulation de la probabilité qu'un rayon laser atteigne un certain point la hauteur z sans avoir été renvoyé est proposée (*Directional gap probability function*). Cette fonction est primordiale car elle lie la structure de la canopée et l'onde lidar FW via l'équation lidar. Notons la $P(z, \theta_i)$ où θ_i est la direction de visée du lidar. Alors :

$$P(z, \theta_i) = \exp \left(- \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} G(z, \theta_i) F_a(z) \frac{dz}{\cos \theta_i} \right) \quad (22)$$

$G(z, \theta_i)$ décrit les propriétés d'orientation des feuilles et $F_a(z)$ la densité volumique de surface foliaire à la hauteur z . Un travail sur l'estimation probabiliste de la structure de la canopée est également développé selon une répartition aléatoire des arbres avec une couche et une espèce (*i.e.* une forme) ou une modélisation de la répartition des arbres avec deux espèces sur deux couches altimétriques différentes.

Il s'avère en fait nécessaire de connaître quelques paramètres sur la forêt en question pour estimer la *Directional gap probability function* (comme le folliage moyen, les hauteurs minimale et maximale de répartition des arbres, le demi-petit et grand axes de l'ellipse...), ce qui rend incontournables les mesures terrains.

Au final, les résultats obtenus valident la modélisation proposée comparativement à des données SLICER et LVIS [Peterson *et al.*, 2001]. Le modèle GORT est capable de caractériser les ondes retour en utilisant peu de paramètres. Toutefois, dû à l'effet de recouvrement des feuilles, un paramètre critique apparaît : le rapport $\frac{\rho_v}{\rho_g}$ doit être obtenu indépendamment.

Holmgren décrit une approche tridimensionnelle pour modéliser l'effet de l'angle de balayage sur la mesure de la hauteur des arbres et de la fermeture du couvert en forêt boréale [Holmgren, 2003]. Les paramètres ont été simulés en appliquant la technique du lancer de rayons, avec différentes espèces, à différentes densités. Les résultats montrent que les mesures de hauteur et la proportion de retours du couvert changent davantage avec l'accroissement de l'angle de balayage dans le cas des espèces à couronne longue (épicéa), comparativement aux espèces à couronne courte (pin). De plus, il s'avère que la proportion de retours du couvert est plus affectée par la variation de l'angle de scan que les mesures de hauteurs.

Koetz *et al.* [Koetz *et al.*, 2006] se servent de la modélisation 3D de [Sun et Ranson, 2000]. Le modèle de transfert radiatif proposé est inversé pour retrouver des paramètres biophysiques des forêts en utilisant une approche par table de correspondance. Pour cela, des données de différents types de forêts sont simulées en choisissant au hasard leurs paramètres, selon une distribution uniforme. Un certain nombre de paramètres sont fixés à partir de mesures spectrométriques *in-situ* ou d'approximations (distribu-

tion foliaire sphérique, cônes hémiploïdiques, terrain plat). La solution du modèle inversé est obtenue en minimisant une fonction de mérite, différence entre les mesures réelles et simulées. Étant donné le grand nombre de paramètres dans le modèle, leur intercorrélation, l'incertitude du modèle et des mesures, le problème d'inversion du modèle, déjà complexe, s'avère mal posé. Il n'y a pas de solution unique. Le médian des dix meilleures solutions est choisi. Cela permet d'obtenir une solution finale avec une mesure d'incertitude de l'inversion. En conclusion, les données simulées prouvent la faisabilité de l'inversion qui montre les paramètres potentiellement déductibles : la hauteur des arbres est bien estimée contrairement aux autres paramètres, comme le LAI ou le couvert végétal.

Les méthodes décrites précédemment ne prennent pas en compte les rétrodiffusions multiples pouvant également contribuer à former l'onde retour. En effet, le multi-trajet est possible. Une cible peut renvoyer le faisceau dans une autre direction que celle du système, celle d'une autre cible par exemple, qui elle-même le renverra au lidar (figure 14). L'approche décrite dans [Kotchenova, 2005] s'appuie sur le fait que cette hypothèse, fautive, peut conduire à des erreurs dans la modélisation des portions basses de l'onde enregistrée, en particulier en présence de canopée dense. Pour y remédier, un modèle de transfert radiatif 3D pour simuler la propagation des photons à travers la végétation est appliqué. Cette modélisation permet de décrire l'effet de *clumping* ou les disparités intra-canopée. Elle prend également un certain nombre de paramètres en entrée tels que les caractéristiques de radiation, des paramètres de structure de canopée et les propriétés optiques des feuilles et du sol. Sa résolution est complexe et nécessite également quelques simplifications. Des artefacts peuvent alors apparaître. Les prédictions obtenues sur différents sites de forêts mixtes sont comparées à des données SLICER et montrent des résultats disparates. Le signal réel n'est pas tout le temps bien restitué et ceci indépendamment de l'essence des arbres. La principale limitation du modèle vient de la formulation

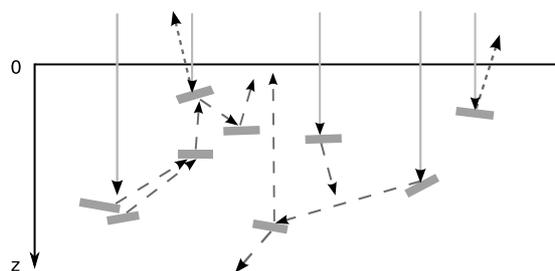


Figure 14. Représentation schématique d'une diffusion simple et multiple de photons à l'intérieur de la canopée. Les lignes continues orange représentent le flux d'arrivée. Les lignes en traits discontinus montrent le chemin des photons plusieurs fois renvoyés. Les lignes pointillées représentent les photons rétrodiffusés directement. Les rectangles verts schématisent les feuilles. Il s'agit d'une modélisation théorique toutefois assez simpliste. En réalité, à chaque feuille touchée, l'écho est diffusé dans tout le demi-espace extérieur.

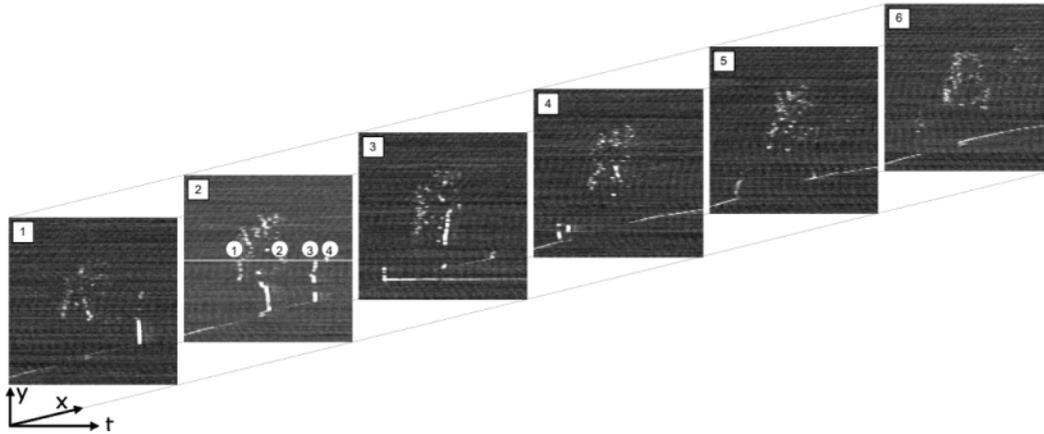


Figure 15. Tranches verticales dans le plan $y - t$ d'un cube de données lidar avec végétation, sol et bâtiments. Les numéros 1 à 4 indiquent les échos trouvés dans la deuxième tranche à gauche avec au centre de la végétation, et des bâtiments à droite [Jutzi et Stilla, 2004].

des fonctions de probabilités quantifiant la structure de la canopée. Celles-ci ne peuvent modéliser qu'une réalité simplifiée.

5.5. Applications au milieu urbain

Les échos multiples apparaissent typiquement en présence de végétation mais également sur les bords des bâtiments. L'étude de l'apport du traitement de l'intégralité du signal rétrodiffusé d'un lidar dans un contexte applicatif urbain n'a cependant été abordé que par l'Institut FGAN-FOM (Research Institute for Optronics and Pattern Recognition) d'Ettlingen en Allemagne à travers les travaux de B. Jutzi. Le FOM a développé son propre système expérimental.

Jutzi et Stilla [Jutzi et Stilla, 2003] montrent qu'il est possible de discriminer différents matériaux urbains atteints par un faisceau laser et conclue sur le fait qu'il est nécessaire d'effectuer des traitements plus approfondis pour espérer reconnaître des objets (cf. partie 5.1). Il utilise pour la première fois des notions de voisinages entre ondes et points pour mieux interpréter leurs données. Désormais, si l'on connaît les points extraits d'une onde émise à l'instant τ et ceux émis à $\tau - 1$ et $\tau + 1$, il est possible d'améliorer le niveau de compréhension d'un nuage 3D, d'effectuer des connexions spatiales « transversales » entre points.

Le problème de la détection des limites de bâtiments est abordé dans [Jutzi et Stilla, 2004] et [Jutzi *et al.*, 2005]. Une segmentation binaire de la scène par croissance de régions est proposée en fonction de l'intensité et de la distance à la cible en « zone frontière » et « zone intérieure ». Il s'aide du fait que l'on constate des échos multiples en bord de bâtiments par rapport à des zones planes (écho unique). Des résultats précis sont obtenus avec une précision déclarée de $\frac{1}{10}$ à $\frac{1}{12}$ de pixel. Il faut toutefois signaler que ces résultats sont obtenus en supposant une réflectance uniforme (*i.e.* dépendant uniquement de leur forme géométrique) et des zones « intérieures » planes.

Enfin, par analyse des paramètres de chaque écho et en considérant une nouvelle fois des relations entre ondes voisines, ils discriminent en zones urbaines végétation et structures humaines puis extraient des lignes caractéristiques dans les objets présents dans la scène.

Un cube de mesures spatio-temporel (x, y, t) (détecteur matriciel de distances) est tout d'abord généré pour visualiser des relations de voisinage. Il est ensuite coupé en tranches verticales suivant le plan $y - t$ pour fournir des informations en 2,5D et les relations souhaitées (figure 15).

Il s'agit de détecter des segments 3D à l'intérieur de ce cube. Supposons une scène composée d'une surface plane perpendiculaire à l'onde incidente (façade). Pour chaque mesure, nous avons une distribution 1D de l'intensité selon le temps. En alignant des voisinages selon y , on obtient des plans $y - t$ de distribution d'intensité avec, selon l'axe y , une ligne parallèle de valeur maximale. Le temps associé à cette ligne correspond à la distance au capteur. On obtient n images d'intensité induites par les effets rétrodiffusants de la surface (rugosité) et qui peuvent être désormais traitées par des détecteurs de lignes (ici la transformée de Hough). Les résultats obtenus sont pour l'instant peu précis et incomplets, des arbres étant par exemple détectés.

6. Conclusion

Les nouveaux systèmes lidar à retour d'onde complète, ou *full-waveform* permettent une description plus approfondie de la topographie terrestre. Des systèmes commerciaux sont désormais disponibles, de nombreuses études exploitent ce type de données et en ont montré les fortes potentialités.

Un certain nombre de paramètres contingentent les performances des lidar *full-waveform* et dictent ses potentialités réelles. Ainsi, le choix d'un système à large ou à faible empreinte au sol va refléter une stratégie d'acquisition des données par-

ticulière en milieu forestier. Cela dépend des objectifs : une large couverture d'une zone pour connaître des paramètres généraux (hauteur des arbres) ou une description fine de l'altitude des structures présentes dans le cône de diffraction. De même, la qualité d'échantillonnage du signal retour n'est pas constante sur tous les capteurs et dicte la résolution altimétrique entre objets présents dans le faisceau. On ne pourra donc pas discriminer deux objets superposés à des altitudes trop proches si trop peu d'échantillons sont sauvegardés lors de l'acquisition. Enfin, le choix de la méthode pour traiter le signal retour est un paramètre qu'il faut prendre en compte car les résultats varient d'une méthode à une autre. La stratégie d'exploitation des données *full-wave* intervient également pour ce choix.

L'apport véritable des systèmes *full-waveform* se situe à deux niveaux : tout d'abord, le traitement des ondes retour permet la récupération précise d'un plus grand nombre d'échos par impulsion que les systèmes temps-réels embarqués. Cela conduit ainsi à une légère densification des nuages de points et surtout à une meilleure qualité des points extraits. D'autre part, par modélisation de l'onde rétrodiffusée, d'autres informations sont extraites, l'intensité, parfois disponible avec des systèmes ME, et la largeur des échos. Ces deux données portent des informations sur la géométrie et la radiométrie de l'objet atteint.

Les thématiques d'application des données *full-wave* sont avant tout les sciences forestières. Cela vient du fait que les premiers lidar *full-wave* expérimentaux, à large empreinte au sol, ont été développés dans ce but et dont les données sont exploitées depuis plus de dix années. Ils permettent la restitution plus détaillée des structures végétales. On peut donc estimer, modéliser ou inférer des paramètres forestiers en plus grand nombre et de manière plus fiable. De plus, les données FW sont utilisées en modélisation 3D de scènes végétales, étudiant l'influence des différents paramètres sur la forme de l'onde retour, pour valider les modèles développés.

En milieu urbain, la contribution est moins évidente. Le *full-wave* ne permet pas de pénétrer dans des structures rigides opaques telles que des bâtiments. Les perspectives de recherche semblent plus être l'analyse des autres paramètres extraits de l'onde (intensité et largeur) et l'établissement de relations de voisinages entre échos d'ondes successives pour la classification des paysages urbains (détection fine de bords de toits, séparation nette végétation/bâtiment).

Les modèles numériques de terrain et de surface (MNT/MNS), de par la haute pénétrabilité du faisceau laser et l'extraction contrôlée des points 3D, bénéficient des données issues du lidar à retour d'onde complète pour l'estimation du sol sous couvert végétal et une meilleure précision des points extraits.

En conclusion, les études menées sur l'exploitation des données lidar FW n'utilisent que partiellement les informations extraites des ondes retour. L'intensité n'est que rarement exploitée car elle doit en particulier être calibrée pour être utilisable. Par ailleurs, pour caractériser des scènes avec les trois principales informations extraites de chaque point, il est indispensable de connaître l'influence de la géométrie et de la radiométrie des objets sur le signal. De nombreux travaux ont déjà été menés en

milieux urbains et forestiers, mais aucune conclusion générale n'a pu être formulée. On ne peut à l'heure actuelle déterminer sans ambiguïté en fonction du quintuplet (x, y, z, I, σ) le matériau ou l'espèce d'arbre atteint. La décorrélation des influences géométrique et radiométrique est nécessaire pour y parvenir et constitue la perspective de recherche la plus importante.

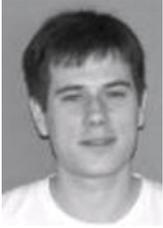
Enfin, il apparaît indispensable de se confronter à l'image ou de s'en aider dans une volonté de cartographie en milieux urbains et forestiers.

Références

- [AHOKAS *et al.*, 2003] E. Ahokas, H. Kaartinen et J. Hyypä. A Quality Assessment of Airborne Laser Scanner Data. In *IAPRS*, volume XXXIV-3/W13, pages 1-7, Dresde, Allemagne, Octobre 2003.
- [AHOKAS *et al.*, 2006] E. Ahokas, S. Kaasalainen, J. Hyypä et J. Suomalainen. Calibration of the Optech ALTM-3100 laser scanner intensity data using brightness targets. In *IAPRS*, volume XXXVI-1, Paris, France, Juillet 2006.
- [ANDERSEN *et al.*, 2005] H-E. Andersen, R.J. McGaughey et S. Reutebuch. Estimating forest canopy fuel parameters using LIDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 94(6):441-449, 2005.
- [BALTSAVIAS, 1999a] E.P. Baltsavias. Airborne laser scanning : basic relations and formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54:199-214, Décembre 1999.
- [BALTSAVIAS, 1999b] E.P. Baltsavias. Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54:164-198, Décembre 1999.
- [BLAIR *et al.*, 1999] J.B. Blair, D.L. Rabine et M.A. Hofton. The Laser Vegetation Imaging Sensor: a medium-altitude digitisation-only, airborne laser altimeter for mapping vegetation and topography. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54:115-122, 1999.
- [BLAIR et HOFTON, 1999] J.B. Blair et M.A. Hofton. Modeling Laser Altimeter Return Waveform Over Complex Vegetation Using High-Resolution Elevation Data. *Geophysical Research Letters*, 26(16):2509-2512, 1999.
- [BRENNER *et al.*, 2003] A. Brenner, H.J. Zwally, C. Bentley, B. Csathó, D.J. Harding, M. Hofton, B. Minster, L. Roberts, J. Saba, R. Thomas et D. Yi. Derivation of Range and Range Distributions From Laser Pulse Waveform Analysis for Surface Elevations, Roughness, Slope, and Vegetation Heights. Rapport de recherche, Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) – Algorithm Theoretical Basis Document Version 4.1, 2003.
- [BRETAR, 2006] F. Bretar. *Couplage de Données Laser Aéroporté et Photogrammétriques pour l'Analyse de Scènes Tridimensionnelles*. Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure des Télécommunications de Paris, France, Juin 2006.
- [CARABAJAL *et al.*, 1999] C.C. Carabajal, D.J. Harding, S.B. Luthcke, W. Fong, S.C. Rowton et J.J. Frawley. Processing of Shuttle Laser Altimeter range and return pulse data in support of SLA-02. In *IAPRS*, volume XXXII-3/W14, La Jolla, États-Unis, Novembre 1999.
- [CARLSSON *et al.*, 2001] T. Carlsson, O. Steinvall et D. Letalick. Signature Simulation and Signal Analysis for 3-D Laser Radar. Rapport de Recherche FOI-R-0163-SE, FOI, 2001.
- [CHAUVE *et al.*, 2007] A. Chauve, C. Mallet, F. Bretar, S. Durrieu, M. Pierrot-Deseilligny et W. Puech. Processing full-waveform lidar data : modelling raw signals. In *IAPRS*, volume XXXVI-3/W52, Espoo, Finlande, Septembre 2007.
- [DAY, 1969] N.E. Day. Estimating the components of a mixture of normal distributions. *Biometrika*, 56:463-474, 1969.
- [DER *et al.*, 1997] S. Der, B. Redman et R. Chellapa. Simulation of error in optical radar range measurements. *Applied Optics*, 36(27):6869-6874, Septembre 1997.

- [DRAKE *et al.*, 2002] J.B. Drake, R.O. Dubayah, D.B. Clark, R.G. Knox, J.B. Blair, M.A. Hofton, R.L. Chazdon, J.F. Weishampel et S.D. Prince. Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar. *Remote Sensing of Environment*, 79(2-3):305-319, 2002.
- [DROBINSKI *et al.*, 2000] P.Drobinski, A.M. Dabas et P.H. Flamant. Remote measurement of turbulent wind spectra by heterodyne Doppler lidar technique. *Journal of Applied Meteorology*, 39(12):2434-2451, 2000.
- [DUBAYAH *et al.*, 1997] R.Dubayah, J.B. Blair, J.L. Bufton, D.B. Clark, J.Ja Ja, R. Knox, S.B. Luthcke, S.Prince et J.Weishampel. The Vegetation Canopy Lidar Mission. In *ASPRS, Land Satellite Information in the Next Decade II: Sources and Applications*, pages 100-112, 1997.
- [DUBAYAH et BLAIR, 2000] R. Dubayah et J.B. Blair. Lidar Remote Sensing for Forestry Applications. *Journal of Forestry*, 98(6):44-46, 2000.
- [DUCIC *et al.*, 2006] V.Ducic, M. Hollaus, A. Ullrich, W. Wagner et T. Melzer. 3D Vegetation mapping and classification using full-waveform laser scanning. In *EARSeL and ISPRS Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry*, pages 222-228, Vienne, Autriche, Février 2006.
- [FILIN, 2002] S. Filin. Surface clustering from airborne laser scanning data. In *IAPRS*, volume XXXIV-3A/B, pages 119-124, Graz, Autriche, Septembre 2002.
- [GLA, 2006] <http://glas.gsfc.nasa.gov/>. Site Web du système GLAS associé la mission ICESAT, 2006. Consulté le 14 novembre 2006.
- [GREEN, 1995] P.J. Green. Reversible Jump Markov Chain Monte-Carlo computation and Bayesian model determination. *Biometrika*, 57: 97-109, 1995.
- [GROSS *et al.*, 2007] H. Gross, B. Jutzi et U. Thoennessen. Segmentation of tree regions using data of a full-waveform laser. In *IAPRS*, volume XXXVI, Part 3/W49A, pages 57-62, Munich, Allemagne, Septembre 2007.
- [GUENTHER *et al.*, 2000] G.C. Guenther, A.G. Cunningham, P.E. La Rocque et D.J. Reid. Meeting the accuracy challenge in airborne lidar bathymetry. In *Proc 20th EARSeL Symposium: Workshop on Lidar Remote Sensing of Land and Sea*, Juin 2000.
- [GUENTHER et MESICK, 1988] G.C. Guenther et H.C. Mesick. Analysis of airborne lidar bathymetric waveforms. In *Proc. of SPIE Ocean Optics IX*, volume 925, pages 232-241, 1988.
- [HAALA et BRENNER, 1999] N. Haala et C. Brenner. Extraction of buildings and trees in urban environments. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54(2-3):130-137, Juillet 1999.
- [HARDING *et al.*, 1999] D.J. Harding, D.B. Gesch, C.C. Carabajal et S.B. Luthcke. Application of the Shuttle Laser Altimeter in an accuracy assessment of GTOPO30, a global 1-kilometer digital elevation model. In *IAPRS*, volume XXXII-3/W14, La Jolla, États-Unis, Novembre 1999.
- [HARDING *et al.*, 2001] D.J. Harding, M.A. Lefsky et G.G. Parker. Laser altimeter canopy height profiles. Methods and validation for closed-canopy, broadleaf forests. *Remote Sensing of Environment*, 76(9): 283-297, 2001.
- [HARTLEY et ZISSERMAN, 2000] R. Hartley et A. Zisserman. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press, 2000.
- [HERNÁNDEZ-MARÍN *et al.*, 2007] S. Hernández-Marín, A.M. Wallace et G.J. Gibson. Bayesian Analysis of Lidar Signals with Multiple Returns. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 29(12):2170-2180, Décembre 2007.
- [HOFTON *et al.*, 2000] M.A. Hofton, J.B. Minster et J.B. Blair. Decomposition of Laser Altimeter Waveforms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(4):1989-1996, 2000.
- [HOLMGREN et PERSSON, 2004] J. Holmgren et Å. Persson. Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. *Remote Sensing of Environment*, 90(4):415-423, 2004.
- [HOLMGREN, 2003] J. Holmgren. *Estimation of Forest Variables using Airborne Laser Scanning*. Thèse de Doctorat, Swedish University of Agricultural Sciences, Umeå, Suède, 2003.
- [HUG *et al.*, 2004] C. Hug, A. Ullrich et A. Grimm. Litemapper-5600 – A Waveform-Digitizing LIDAR Terrain and Vegetation Mapping System. In *IAPRS*, volume XXXVI-8/W2, pages 24-29, Fribourg, Allemagne, Octobre 2004.
- [HUISING et PEREIRA, 1998] E.P.J. Huising et L.M. Gomes Pereira. Errors and accuracy estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 53(5):1245-1261, 1998.
- [HYDE *et al.*, 2005] P. Hyde, R. Dubayah, B. Peterson, J.B. Blair, M. Hofton, C. Hunsaker, R. Knox et W. Walker. Mapping forest structure for wild-life habitat analysis using waveform lidar: Validation of montane ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 96:427-437, Août 2005.
- [ICE, 2006] <http://icesat.gsfc.nasa.gov/>. Site Web de la mission ICESAT avec en particulier des informations techniques et des données sur le capteur GLAS, 2006. Consulté le 15 novembre 2006.
- [JUTZI *et al.*, 2005] B. Jutzi, J. Neulist et U. Stilla. Sub-pixel edge localization based on laser waveform analysis. In *IAPRS*, volume XXXVI-3/W19, pages 109-114, Enschede, Pays-Bas, Septembre 2005.
- [JUTZI et STILLA, 2003] B. Jutzi et U. Stilla. Laser pulse analysis for reconstruction and classification of urban objects. In *IAPRS*, volume XXXIV, Part 3/W8, pages 151-156, Munich, Allemagne, Septembre 2003.
- [JUTZI et STILLA, 2004] B. Jutzi et U. Stilla. Extraction of Features from Objects in urban areas using-space-time analysis of recorded laser pulses. In *IAPRS*, volume XXXV-B2, pages 1-6, Istanbul, Turquie, Juillet 2004.
- [JUTZI et STILLA, 2006] B. Jutzi et U. Stilla. Range determination with waveform recording laser systems using a Wiener Filter. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 61:95-107, Septembre 2006.
- [KAASALAINEN *et al.*, 2005] S. Kaasalainen, E. Ahokas, J. Hyypä et J. Suomalainen. Study of Surface Brightness From Backscattered Laser Intensity: Calibration of Laser Data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2(3):255-259, Juillet 2005.
- [KASSER et EGELS, 2001] M. Kasser et Y. Egels. *Photogrammétrie Numérique*. Hermès, Lavoisier, 2001.
- [KIMES *et al.*, 2006] D.S. Kimes, K.J. Ranson, G. Sun et J.B. Blair. Predicting lidar measured forest vertical structure from multi-angle spectral data. *Remote Sensing of Environment*, 100(4):503-511, Février 2006.
- [KOETZ *et al.*, 2006] B. Koetz, F. Morsdorf, G. Sun, K.J. Ranson, K. Itten et B. Allgöwer. Inversion of a Lidar Waveform Model for Forest Biophysical Parameter Estimation. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 3(1):49-53, Janvier 2006.
- [KOTCHENOVA, 2005] S. Kotchenova. *New approaches to retrieval and application of lidar-measured vegetation vertical canopy profiles*. Thèse de Doctorat, University of Boston, États-Unis, 2005.
- [LACHÉRADE *et al.*, 2005] S. Lachérade, C. Miesch, X. Briottet et H. Le Men. Spectral variability and bidirectional reflectance behaviour of urban materials at a 20 cm spatial resolution in the visible and near infrared wavelengths. A case study over Toulouse (France). *International Journal of Remote Sensing*, 26(17):3859-3866, 2005.
- [LEFSKY *et al.*, 1999] M.A. Lefsky, D.J. Harding, W.B. Cohen, G.G. Parker et H.H. Shugart. Surface lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of eastern Maryland, USA. *Remote Sensing of Environment*, 68:83-98, 1999.
- [LEFSKY *et al.*, 2002] M.A. Lefsky, W.B. Cohen, G.G. Parker et D.J. Harding. Lidar Remote Sensing for Ecosystem Studies. *BioScience*, 52:19-30, Janvier 2002.
- [LIM *et al.*, 2003] K. Lim, P. Treitz, M. Wulder, B. Saint-Onge et M. Flood. Lidar remote sensing of forest structure. *Progress in Physical Geography*, 27(1):88-106, 2003.
- [LVI, 2007] <http://lvis.gsfc.nasa.gov/>. Site Web du capteur LVIS, 2003. Consulté le 9 janvier 2007.
- [MALLET *et al.*, 2008] C. Mallet, A. Chauve et F. Bretar. Analyse et traitement d'ondes lidar pour la cartographie et la reconnaissance de formes : Application au milieu urbain. In *Reconnaissance de Formes et Intelligence Artificielle (RFIA)*, Amiens, France, Janvier 2008.

- [MARQUARDT, 1969] D. Marquardt. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 11(2):431-441, 1969.
- [MEANS *et al.*, 1999] J.E. Means, S.A. Acker, D.J. Harding, J.B. Blair, M.A. Lefsky, W.B. Cohen, M.E. Harmon et W.A. McKee. Use of large-footprint scanning airborne Lidar to estimate forest stand characteristics in the western cascades of Oregon. *Remote Sensing of Environment*, 67(3):298-308, 1999.
- [NAESSET et ØKLAND, 2002] E. Naesset et T. Økland. Estimating tree heights and tree crown properties using airborne laser scanning laser in a boreal nature reserve. *Remote Sensing of Environment*, 79(1):105-115, 2002.
- [NAESSET, 1997] E. Naesset. Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 52(2):49-56, 1997.
- [NI-MEISTER *et al.*, 2001] W. Ni-Meister, D.L.B. Jupp et R. Dubayah. Modeling Lidar Waveforms in Heterogeneous and Discrete Canopies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(9):1943-1958, Septembre 2001.
- [PARKER *et al.*, 2001] G.G. Parker, M.A. Lefsky et D.J. Harding. Light Transmittance in forest canopies determined from airborne lidar altimetry and from in-canopy quantum measurements. *Remote Sensing of Environment*, 76:298-309, 2001.
- [PERRIN, 2006] G. Perrin. *Étude du Couvert Forestier par Processus Ponctuels Marqués*. Thèse de Doctorat, École Centrale de Paris, France, Octobre 2006.
- [PERSSON *et al.*, 2005] Å. Persson, U. Söderman, J. Töpel et S. Alhberg. Visualization and Analysis of Full-Waveform Airborne Laser Scanner Data. In *IAPRS*, volume XXXVI-3/W19, pages 103-108, Enschede, Pays-Bas, Septembre 2005.
- [PETERSON *et al.*, 2001] B. Peterson, W. Ni-Meister, J.B. Blair, M.A. Hofton, P. Hyde et R. Dubayah. Modeling Lidar Waveforms using a Radiative Transfer Model. In *IAPRS*, volume XXXIV-3/W4 of *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, pages 121-124, Annapolis, États-Unis, Octobre 2001.
- [POLLOCK, 1996] R. Pollock. *The Automatic Recognition of Individual Trees in Aerial Images of Forests based on a Synthetic Tree Crown Image Model*. Thèse de Doctorat, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 1996.
- [POPESCU *et al.*, 2003] S.C. Popescu, R.H. Wynne et R.F. Nelson. Measuring individual tree crown diameter with lidar and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(5):564-577, 2003.
- [POULIOT *et al.*, 2002] D. Pouliot, D. King, F. Bell et D. Pitt. Automated tree crown detection and delineation in high-resolution digital camera imagery of coniferous forest regeneration. *Remote Sensing of Environment*, 82:322-334, 2002.
- [REITBERGER *et al.*, 2006] J. Reitberger, P. Krzystek et U. Stilla. Analysis of full-waveform lidar data for tree species classification. In *IAPRS*, volume XXXVI, pages 228-233, Bonn, Allemagne, Septembre 2006.
- [REUTEBUCH *et al.*, 2005] S. Reutebuch, H-E. Andersen et R.J. McGaughey. *LIDAR: An emerging tool for multiple resource inventory*. *Journal of Forestry*, 103(6):286-292, 2005.
- [RICHARDSON et GREEN, 1997] S. Richardson et P.J. Green. On Bayesian Analysis of Mixtures with an Unknown Number of Components. *Journal of the Royal Statistical Society*, 59(4):731-792, 1997.
- [SITHOLE, 2005] G. Sithole. *Segmentation and Classification of Airborne Laser Scanner Data*. Thèse de Doctorat, ITC, Université de Delft, Pays-Bas, 2005.
- [SLI, 2006] <http://denali.gsfc.nasa.gov/lapf/>. Site Web sur les capteurs SLICER et SLA. Spécifications et données, 2006. Consulté le 14 novembre 2006.
- [STEINVALL, 2000] O. Steinvall. Waveform simulation for 3-D sensing laser radars. Rapport de Recherche FOI-R-1530-SE, FOI – Swedish Defence Research Institute, Mai 2000.
- [STILLA *et al.*, 2007] U. Stilla, W. Yao et B. Jutzi. Detection of weak laser pulses by full-waveform stacking. In *IAPRS*, volume XXXVI, Part 3/W49A, pages 25-30, Munich, Allemagne, Septembre 2007.
- [SUN et RANSON, 2000] G. Sun et K.J. Ranson. Modeling Lidar Returns from Forest Canopies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(6):2261-2266, Novembre 2000.
- [THIEL et WEHR, 2004] K.H. Thiel et A. Wehr. Performance and capabilities of laser scanners – an overview and measurement principle analysis. In *IAPRS*, volume XXXVI-8/W2, pages 14-18, Fribourg, Allemagne, Octobre 2004.
- [VANDAPEL *et al.*, 2004] N. Vandapel, O. Amidi et J.R. Miller. Toward Laser Pulse Waveform Analysis for Scene Interpretation. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'04), Avril 2004.
- [VCL, 2006] <http://www.geog.umd.edu/vcl/>. Site Web de la campagne VCL (Vegetation Canopy Lidar), 2006. Consulté le 14 novembre 2006.
- [WAGNER *et al.*, 2004] W. Wagner, A. Ullrich, T. Melzer, C. Briese et K. Kraus. From single-pulse to full-waveform airborne laser scanners: Potential and practical challenges. In *IAPRS*, volume XXXV, Part B3, pages 201-206, Istanbul, Turquie, juillet 2004.
- [WAGNER *et al.*, 2006] W. Wagner, A. Ullrich, V. Ducic, T. Melzer et N. Studnicka. Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 66:100-112, Janvier 2006.
- [WEISHAMPPEL *et al.*, 2000] J.F. Weishampel, J.B. Blair, R.G. Knox, R. Dubayah et D.B. Clark. Volumetric lidar return patterns from an old-growth tropical rainforest canopy. *International Journal of Remote Sensing*, 21:409-415-2437, 2000.
- [WONG et ANTONIOU, 1991] H. Wong et A. Antoniou. Characterization and Decomposition of Waveforms for LARSEN 500 Airborne System. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 29(6):912-921, 1991.
- [YU *et al.*, 2004] X. Yu, J. Hyypä, H. Kaartinen et M. Maltamo. Automatic Detection of Harvested Trees and Determination of Forest Growth Using Airborne Laser Scanning. *Remote Sensing of Environment*, 90(4):451-462, 2004.
- [ZIMBLE *et al.*, 2003] D.A. Zimble, D.L. Evans, G.C. Carlson, R.C. Parker, S.C. Grado et P.D. Gerard. Characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne LIDAR. *Remote Sensing of Environment*, 87(2-3):171-182, 2003.
- [ZWALLY *et al.*, 2002] H.J. Zwally, B. Schutz, W. Abdalati, J. Abshire, C. Bentley, A. Brenner, J. Bufton, J. Dezio, D. Hancock, D.J. Harding, T. Herring, B. Minster, K. Quinn, S. Palm, J. Spinirne et R. Thomas. ICESat's laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean, and land. *Journal of Geodynamics*, 34(3):405-445, Octobre 2002.



Clément. Mallet

Clément Mallet a obtenu conjointement un diplôme d'ingénieur de l'École Nationale des Sciences Géographiques et un Master 2 Recherche en « Méthodes Physiques par Télédétection » de l'Université Pierre et Marie Curie de Paris en 2005. Depuis, il travaille au sein du laboratoire MATIS de l'IGN sur la gestion et le traitement de données issues de systèmes lidar aéroporté. Il réalise désormais un doctorat à Télécom ParisTech conjointement avec l'Université de Hanovre (Allemagne) sur l'analyse des ondes lidar pour la cartographie automatique des milieux urbains. Ses thèmes de recherche concernent l'analyse physique des signaux lidar pour la classification et la reconstruction 3D de zones urbaines.



Frédéric. Bretar

Frédéric Bretar est responsable de l'Action de Recherche LASER au sein du laboratoire « Méthodes d'Analyses et de Traitement d'Image pour la Stéréo-restitution » (MATIS) de l'Institut Géographique National depuis 2006. Il est ingénieur de l'École Nationale des Sciences Géographiques et est titulaire d'un DEA de « Méthodes Physiques en Télédétection » (2000). Il a obtenu un doctorat de l'École Nationale Supérieure des Télécommunications de Paris en 2006. Comme chercheur invité, il a travaillé au Norwegian Defense Research Establishment entre 2000 et 2002 sur des problématiques liées au Radar. Aujourd'hui, son domaine de recherche concerne le traitement de données lidar (nuage de points et ondes complètes) et la fusion avec des données image.



