HAL
open science

Evaluation de l'apport des visées multi-angulaires en imagerie laser pour la reconstruction 3D des couverts végétaux.

T. Ristorcelli

To cite this version:

T. Ristorcelli. Evaluation de l'apport des visées multi-angulaires en imagerie laser pour la reconstruction 3D des couverts végétaux.. Optique [physics.optics]. Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace - ISAE, 2013. Français. NNT : . tel-01020525

HAL Id: tel-01020525

https://theses.hal.science/tel-01020525v1

Submitted on 8 Jul 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par : *l'Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace (ISAE)*

Présentée et soutenue le *20/12/2013* **par :**

Ristorcelli Thomas

Evaluation de l'apport des visées multi-angulaires en imagerie laser pour la reconstruction 3D des couverts végétaux.

JURY

Christian HEIPKE	Professeur d'Université	Président du Jury
Nicolas BAGHDADI	Directeur de Recherche	Membre du Jury
Xavier BRIOTTET	Directeur de Recherche	Membre du Jury
J.-P. GASTELLU	Professeur d'Université	Membre du Jury
Dominique HAMOIR	Ingénieur	Membre du Jury
C. DELACOURT	Professeur d'Université	Membre du Jury
Clément MALLET	Chargé de Recherche	Membre du Jury
Philippe ADAM	DGA/MRIS/Photonique	Membre du Jury

École doctorale et spécialité :
GEET : Photonique et Systèmes Optoélectroniques
Unité de Recherche :
OLIMPES - Optronique, laser, imagerie physique et environnement spatial.
Directeur(s) de Thèse :
Xavier BRIOTTET et *Jean-Philippe GASTELLU-ETCHEGORRY*
Rapporteurs :
Christian HEIPKE et *Nicolas BAGHDADI*

La thèse de Thomas RISTORCELLI résulte d'une collaboration entre l'Onera, Magellium, le Cesbio et l'IGN (contrat de collaboration Onera-007849), sous une convention CIFRE-Défense n°13/2010/DGA passée entre Magellium et l'ANRT, et a été menée dans l'unité DOTA/IODI de l'Onera, à Toulouse (Unité de Recherche Olimpes).

Je tiens à remercier Magellium pour m'avoir fait confiance du début à la fin de la thèse, et même au-delà. Et Pauline pour m'avoir soutenu et encouragé dans les moments difficiles.

Table des matières

Résumé **7**

1 Contexte et objectifs **11**
1.1 Introduction 11
1.2 Le scanner laser 12
1.2.1 Vers le lidar « Onde complète » 12
1.2.2 Exemples de systèmes existants 14
1.3 Applications 18
1.3.1 La particularité de la végétation 18
1.3.2 Topographie et végétation 20
1.4 Objectif et méthode 21
1.4.1 Première partie : modéliser la mesure lidar onde complète 22
1.4.2 Deuxième partie : exploiter les données lidar onde complète 23

I Modéliser la mesure lidar onde complète **25**

2 Modélisation physique de la mesure lidar onde complète **27**
2.1 Introduction 27
2.2 Emission laser 28
2.2.1 Aspects temporels 28
2.2.2 Aspects spatiaux 30
2.2.3 Aspects spectraux 31
2.2.4 Bilan 31
2.3 Propagation de l'impulsion émise 31
2.3.1 Propagation dans le vide 31
2.3.2 Propagation dans l'atmosphère 31
2.4 Interaction avec la scène 33
2.4.1 Surfaces planes : BRDF / BTDF 33
2.4.2 Expression générale de la luminance réfléchie 33
2.5 Collection, amplification et numérisation du signal 34
2.5.1 Collection de la luminance réfléchie 34
2.5.2 Mesure et enregistrement du signal 35

3 Modélisation du signal lidar : état de l'art **37**
3.1 Introduction 37
3.2 Simulation du lidar et végétation : différentes approches 37
3.3 Modèles existants, points forts et points faibles 38
3.3.1 Modèles analytiques 38

3.3.2 Végétation maillée . . . 39
3.3.3 Végétation turbide : le modèle DART Lidar . . . 43
3.4 Motivation du développement d'un nouveau modèle . . . 44
3.4.1 Contraintes . . . 44
3.5 Conclusion : LuxRender et le Path-Tracing . . . 45

4 Le simulateur numérique DELiS 47
4.1 Introduction, principe général . . . 47
4.2 Le Path-Tracing pour la simulation du lidar onde complète . . . 48
4.2.1 Principes généraux de simulation . . . 49
4.2.2 Détails des calculs . . . 52
4.2.3 Calcul de la réponse impulsionnelle . . . 53
4.2.4 Bilan, sources d'erreurs . . . 54
4.3 Modèles de soleil et d'atmosphère . . . 55
4.3.1 Simulation de la composante solaire . . . 55
4.3.2 Prise en compte de l'extinction atmosphérique . . . 60
4.3.3 Conclusion . . . 60
4.4 Modèle d'instrument pour DELiS . . . 61
4.4.1 Synthèse de la luminance reçue par le lidar . . . 61
4.4.2 Mesure et amplification du signal . . . 61
4.4.3 Bilan global et ordres de grandeurs . . . 63
4.5 Conclusion . . . 65

5 Modélisation des scènes pour DELiS 67
5.1 Introduction . . . 67
5.2 Modélisation de la végétation . . . 67
5.2.1 Propriétés macroscopiques des couverts végétaux . . . 67
5.2.2 Modèles d'arbres complexes . . . 69
5.3 Propriétés optiques des matériaux . . . 70
5.3.1 Modèle de propriétés optiques des feuilles . . . 70
5.3.2 Autres matériaux présents dans les scènes . . . 75
5.4 Application : la forêt estonienne de Järvselja . . . 76
5.4.1 Données disponibles . . . 77
5.4.2 Hypothèses simplificatrices . . . 77
5.4.3 Propriétés optiques des matériaux . . . 80
5.5 Conclusion . . . 82

6 Validation du modèle DELiS 85
6.1 Introduction . . . 85
6.2 Tests de validation sur scènes simples . . . 86
6.2.1 Test 1 : La marche d'escalier . . . 86
6.2.2 Test 2 : Taille de faisceau . . . 87
6.2.3 Test 3 : Réflectance lambertienne . . . 89
6.2.4 Test 4 : Plan incliné . . . 89
6.2.5 Test 5 : Surface semi-transparente . . . 91
6.3 Tests de validation sur végétation uniforme idéale . . . 93
6.3.1 Expression théorique du signal lidar onde complète . . . 93
6.3.2 Simulations DELiS et comparaison . . . 95
6.4 Vers la validation par comparaison à un système réel . . . 97
6.4.1 Présentation du matériel et du plan d'essais . . . 97

6.4.2 Simulation prédictive des mesures avec DELiS 101
6.4.3 Mesures terrain et analyses préliminaires 105
6.4.4 Conclusion, points à travailler 107
6.5 Conclusion 108

II Reconstruction d'un MNT sous couvert végétal 109

7 Traitement des signaux lidar onde complète 111
7.1 Introduction 111
7.2 Prétraitement des données 112
7.2.1 Retrait de l'offset 112
7.2.2 Lissage des signaux 112
7.2.3 Etalonnage 112
7.3 Décomposition du signal lidar 112
7.3.1 Etat de l'art 113
7.3.2 Détection des échos 114
7.3.3 Un modèle d'écho asymétrique 117
7.4 Résultats, robustesse 119
7.4.1 Jeux de données 119
7.4.2 Choix du seuil pour la détection des échos 120
7.4.3 Evaluation de la qualité de la modélisation des échos 121
7.4.4 Distribution des paramètres de forme 122
7.5 Conclusion 124

8 Classification des données lidar onde complète 125
8.1 Introduction 125
8.2 Etat de l'art 126
8.3 Une classification simple : dernier écho 127
8.4 Modèles de mélange Gaussien 130
8.4.1 Métriques utilisées 130
8.4.2 Principe de la classification 130
8.4.3 Résultats 132
8.5 Correction grâce à la méthode « dernier écho » 135
8.6 Choix d'une classification pour la suite 136
8.7 Conclusion 137

9 Reconstruction de MNT sous couvert végétal 139
9.1 Introduction 139
9.2 Méthode de reconstruction 140
9.2.1 Projection du nuage de points sur une grille régulière 140
9.2.2 Estimation de l'altitude du sol dans une case de la grille 140
9.2.3 Reconstruction du MNT 142
9.3 Résultats et sensibilité 142
9.3.1 Evaluation des différentes méthodes d'estimation de l'altitude du sol . 143
9.3.2 Impact du choix de la résolution 145
9.3.3 Impact de l'angle de visée 147
9.3.4 Synthèse 150
9.4 Amélioration des performances 150
9.4.1 Correction de la classification 152

9.4.2 Correction des reconstructions 154
9.5 Synthèse 155
9.6 Combinaison de visées multi-angulaires 159
9.6.1 Introduction 159
9.6.2 Simulations 159
9.6.3 Combinaison des visées 160
9.6.4 Recherche de la visée optimale 162
9.7 Conclusion 166

10 Conclusions et perspectives **169**
10.1 Conclusions 169
10.1.1 Première partie : le modèle DELiS 169
10.1.2 Deuxième partie : mise en place d'une méthode de reconstruction de MNT sous couvert végétal 171
10.2 Perspectives 174
10.2.1 Améliorations du modèle DELiS 174
10.2.2 Reconstruction des MNT et des couverts végétaux 175
10.2.3 Nouvelles applications du modèle DELiS 178

A Lois de distribution de l'orientation des feuilles **181**

B Publication parue en 2013 **183**

Bibliographie **191**

Résumé

Ces travaux de recherche s'inscrivent dans la problématique scientifique de reconstruction du relief sous un couvert végétal à partir d'observations aéroportées.

Le scanner laser aéroporté est une technique d'imagerie très prometteuse, notamment pour l'observation des zones forestières. Sa déclinaison "onde complète" consiste à émettre une impulsion laser et à enregistrer temporellement l'intégralité des échos de retour réfléchis par la scène. La forme des échos de retour fournit des informations sur l'épaisseur optique du couvert végétal. De nombreux systèmes commerciaux sont en exploitation, en particulier en topographie ou en bathymétrie. Mais ces systèmes ne sont pas dédiés à l'observation de la végétation. L'objectif de cette thèse est l'étude de l'intérêt de ces systèmes pour la construction de modèle numérique de terrain (MNT) sous couvert végétal. Elle est basée sur le développement d'outils de simulation du signal temporel incident au capteur lidar et de traitement des données.

Dans un premier temps, le modèle physique de lidar onde complète, DELiS (n-Dimensional Estimation of Lidar Signals) a été développé. Il permet de simuler l'observation de scènes de végétation réalistes, tout en incluant la prise en compte de l'environnement extérieur (atmosphère, soleil) ainsi que des caractéristiques de la source et de la chaîne de détection (bruits de mesure). DELiS a été validé par confrontation à des résultats analytiques. Ensuite, DELIS a permis de comprendre et d'évaluer l'importance des diffusions multiples dans le couvert en fonction du champ de vue du lidar mais aussi de justifier l'utilisation d'acquisitions aéroportées petit champ pour simuler le signal d'un lidar spatial plus grand champ.

Dans une deuxième étape, ses capacités de simulation ont été utilisées afin d'étudier l'intérêt du lidar onde complète pour la reconstruction d'un MNT sous couvert végétal. Dans ce but, nous avons développé et implémenté numériquement une méthode originale de traitement et de classification des données lidar onde complète permettant de séparer les échos lidar provenant du sol de ceux provenant de la végétation. Après classification des échos, nous avons reconstruit la géométrie du sol et des objets occultés par la végétation.

Enfin, nous avons étudié comment combiner des données aéroportées acquises sous différents points de vue afin d'améliorer les reconstructions. Nos travaux montrent que le scanner laser aéroporté onde complète pourrait permettre d'obtenir en milieux forestier des reconstructions de la géométrie du terrain à des résolutions sub-métriques et avec une précision de l'ordre de 10 à 20 centimètres.

La combinaison de visées multi-angulaire permet, par l'apport d'une quantité importante d'information supplémentaire, d'améliorer encore la reconstruction du MNT. Nous montrons cependant que les visées inclinées sont plus sensibles à la présence des troncs et branchages des arbres, éléments qui sont susceptibles d'introduire une erreur importante dans les processus de classification et de reconstruction. Pour cette raison, nous recommandons l'utilisation de la visée nadir pour la reconstruction mono-vue des modèles numériques de terrain, et nous proposons une méthode permettant de choisir de façon optimale les visées inclinées à ajouter pour l'observation détaillée d'une portion plus restreinte de la scène.

Abstract

This research work regards the scientific challenge of reconstructing the ground and the object presents under a vegetation cover from airborne observations.

Airborne laser scanning is a promising technology. Full-waveform devices are able to record the complete temporal return signal following the emission of a short laser pulse towards the ground. This offers a great potential for remote sensing of forested areas, since the laser pulse will travel through the vegetation. Many commercial systems are already operated for topography or bathymetry. Scientists have been using these systems for vegetation observation, even if they are not dedicated to this purpose. The objective of this thesis is to study the relevance of full-waveform lidars for the geometric reconstruction of digital terrain models (DTM) under vegetation. We also aim at developing simulation and data processing tools that will help design and optimize future sensors dedicated to vegetation observation.

Our first task was the development of a new physical simulator for full-waveform lidar measurement. The DELiS model (n-Dimensional Estimation of Lidar Signals) is able to simulate the observation of complex and realistic vegetation scenes while accounting for atmosphere and sun perturbations, and simulating the multiple scattering of the laser pulse in the canopy. We have also implemented a sensor model for simulation of the measurement, amplification and digitization noises. This operational simulation tool is a key asset for future physical studies as well as for designing and optimizing future sensors and data processing methods.

After validating the DELiS model by confrontation with analytical results, we have used it for studying the interest of full-waveform lidar for digital terrain models reconstruction under vegetation. For this purpose, we have developed a full-waveform lidar data processing method for decomposition of the signals and classification of the lidar echoes into two classes : 'ground' and 'vegetation'. We were then able to reconstruct ground geometry.

Finally, we have led a study on the combination of multi-angular acquisitions for improvement of the reconstructions.

Our work shows that airborne full-waveform lidar observations may allow ground reconstruction with sub-metric resolutions and a precision of 10 to 20 centimeters in forested areas.

Combining multiple viewing angles provides additional data, and helps improving the precision of the reconstructions. Yet, we show that non-nadir viewing is much more sensitive to trunks and branches. These elements may be the cause of an additional error in the classification and reconstruction processes. For this reason, we recommend using nadir viewing for single-view ground reconstruction, and propose a method for optimally selecting non-nadir views for the detailed observation of restricted areas of interest.

Chapitre 1

Contexte et objectifs

Sommaire

1.1 Introduction **11**
1.2 Le scanner laser **12**
1.2.1 Vers le lidar « Onde complète » 12
1.2.2 Exemples de systèmes existants 14
1.3 Applications **18**
1.3.1 La particularité de la végétation 18
1.3.2 Topographie et végétation 20
1.4 Objectif et méthode **21**
1.4.1 Première partie : modéliser la mesure lidar onde complète 22
1.4.2 Deuxième partie : exploiter les données lidar onde complète 23

1.1 Introduction

En 1960, le physicien américain Théodore Maiman parvient pour la première fois à mettre en application le principe d'émission stimulée formulé par *Einstein (1917)*. *Maiman (1960)* utilise un cristal de rubis pour produire et amplifier un rayonnement lumineux cohérent et directionnel. C'est le premier laser (de l'anglais « Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation »).

Deux ans plus tard, L. D. Smullin et G. Fiocco, deux chercheurs du Massachusetts Institute of Technology (MIT) dirigent un laser à rubis vers la surface de la lune. Grâce à un système de télescope, ils parviennent à collecter les quelques photons réfléchis sur la surface lunaire. Le 10 mai 1962, le New York Times reprend l'information en première page sous le titre « Man shines a Light on the Moon »(figure 1.1).

En 1963, les mêmes Fiocco et Smullin publient dans Nature un article dédié à la mesure de composants atmosphériques au moyen d'un système du même type qu'ils nomment « Optical Radar » (radar optique). C'est la première fois qu'un laser est utilisé au sein d'un système qui portera par la suite le nom de « lidar » (pour LIght Detection And Ranging).

Depuis, les lasers de toutes formes (à gaz, à liquide, diodes laser, etc...) ont envahi notre quotidien, et de nombreuses applications ont été développées autour du principe du lidar. La technologie « lidar » englobe toute technique de télédétection ou de mesure optique à distance basée sur l'analyse des propriétés d'une lumière laser renvoyée vers son émetteur.

Le terme « lidar » est d'ailleurs surtout utilisé en météorologie : c'est historiquement le premier domaine d'application des lidar. Ils peuvent servir à sonder l'atmosphère et à mesurer

Man Shines a Light on the Moon

Beam Shot by M.I.T. Is First to Be Sent to Celestial Body

By WALTER SULLIVAN
Special to The New York Times.

CAMBRIDGE, Mass., May 10 —Last night, for the first time, man illuminated another celestial body.

Had someone been standing in the mountainous region southeast of the crater Albategnius on the moon, the stark and darkened lunar landscape about him would have been lighted by a succession of dim red flashes.

The effect is thought to have been limited to a circular area of the moon's surface only one mile in radius. The light beam was produced by engineers from the Massachusetts Institute of Technology, using a device known as a laser or optical maser.

The M. I. T. project was carried out as a spare-time activity by engineers who thought it could be done with the equipment at hand. However, Dr. Townes described the feat as a "benchmark."

He noted that this was the first time a laser had been aimed into space.

Major Role Foreseen

He and many others believe such devices will play a key role in communications with and between space vehicles. They are particularly well suited to use in space because there is no air or water vapor to weaken the light intensity.

Ultimately, Dr. Townes believes, the laser principle may provide an efficient means for transmitting energy long distances. It could be used to provide power to expeditions on the moon or other planets, using sources on the earth. It is also being tested as a surgical knife and may be useful for delicate welding jobs.

The New York Times May 11, 1962

TARGET: The cross marks point on the moon at which the light beam was aimed.

Lasers produce a beam of light so uniform in wave length and polarization that it can be modulated to carry voice, music and television transmissions. The model used last night is believed to be the most powerful developed to date. It was made by the Raytheon Company.

Its central element consists of a six-inch rod of ruby crystal. This is flanked by four lamps, each consisting of a xenon gas tube parallel to the ruby rod. The lights flash for one thousandth of a second, producing almost 2,000 joules of light energy. This is comparable to what would be put out by a 2,000,000-watt light bulb.

Overheating Avoided

This light is reflected back and forth within the crystal, only that part of the light aimed out of a small hole at one end escapes and becomes the lesser beam. The first laser was demonstrated only about two and a half years ago, but had become one of the fastest-developing devices in current technology. The name means light amplification by stimulated emission of radiation.

Thirteen pulses were fired from the laser, at intervals of roughly one minute so that the system would not overheat. Although it was an exceptionally clear night, the experimenters could see a thread of red light high overhead, aimed at the moon. Apparently there was an otherwise invisible haze layer several thousand feet overhead.

The experiment was described at M. I. T. this afternoon by Prof. Louis Smullin of the Department of Electrical Engineering, who was in charge, and by Dr. Giorgio Fiocco, one of his associates. They noted that it took some two and a half seconds for each pulse of light to make the round trip of almost half a million miles.

The reflected light was scattered in all directions. Consequently only an extremely weak signal returned to the forty-eight inch observing telescope used as a receiver. The experiment was carried out at the Institute's Lincoln Laboratories at near-by Lexington. A four-telescope mount was used. The laser was attached to a telescope twelve inches in diameter.

What with the loss of energy, due to scattering of the signal by the lunar surface, only about a dozen photons, or "bits" of light, are thought to have returned to the receiving telescope after each flash. These were focused on a filter that cut out all but the light near 6,934 angstroms. That which remained was then amplified electronically.

The New York Times
Published: May 11, 1962
Copyright © The New York Times

M. I. T. Beams Light to Moon In a Test of the Optical Maser

Figure 1.1 – *Article paru dans le New York Times le 10 mai 1962. L'article original a été tronqué afin de montrer une version plus courte.*

ces différents composants, mais aussi à mesurer la vitesse du vent ou la température grâce à l'effet Doppler (*Studnicka et Doppler (1903)*). Lorsque le même principe est utilisé pour observer la surface terrestre, on parle parfois d'« altimètre laser », ou de « scanner laser ». De tels systèmes sont utilisés sur des plateformes spatiales, comme sur le satellite ICESat, qui embarque un lidar permettant d'obtenir des données altimétriques à l'échelle du globe, et plus particulièrement d'étudier la couche de glace recouvrant le Groenland et l'Antarctique, mais également à bord d'avions ou d'hélicoptères afin d'obtenir des relevés topographiques précis. C'est à ce type de systèmes que nous allons nous intéresser plus particulièrement par la suite.

1.2 Le scanner laser

1.2.1 Vers le lidar « Onde complète »

Comme nous l'avons évoqué, un système lidar se compose de trois éléments clés :
- Une source de lumière ;
- Un système de détection et de mesure du signal lumineux réfléchi ;
- Un système de localisation et de mesure du temps permettant de connaître la position de l'instrument, sa direction de visée ainsi que de mesurer le temps de vol du signal lumineux émis.

Assorti d'un système de balayage de la scène, pouvant exploiter le déplacement de la plateforme, le lidar devient un scanner laser.

A l'intérieur même de la famille des scanners laser, plusieurs types d'instruments se distinguent. En premier lieu, il convient de séparer les instruments dits « à détection cohérente » et « à détection incohérente ». Le principe de détection cohérente utilise la propriété de cohérence de l'émission laser pour mesurer une différence de phase entre l'onde électromagnétique émise et l'onde réfléchie. Par opposition, la détection incohérente consiste à simplement collecter et mesurer l'énergie réfléchie vers le capteur. L'avantage de la détection cohérente est une meilleure précision de la mesure de distance, au détriment de la portée du

système (voir tables 1.6 et 1.7). Les capteurs aéroportés fonctionnent donc tous suivant le principe de la détection incohérente, ou « directe ».

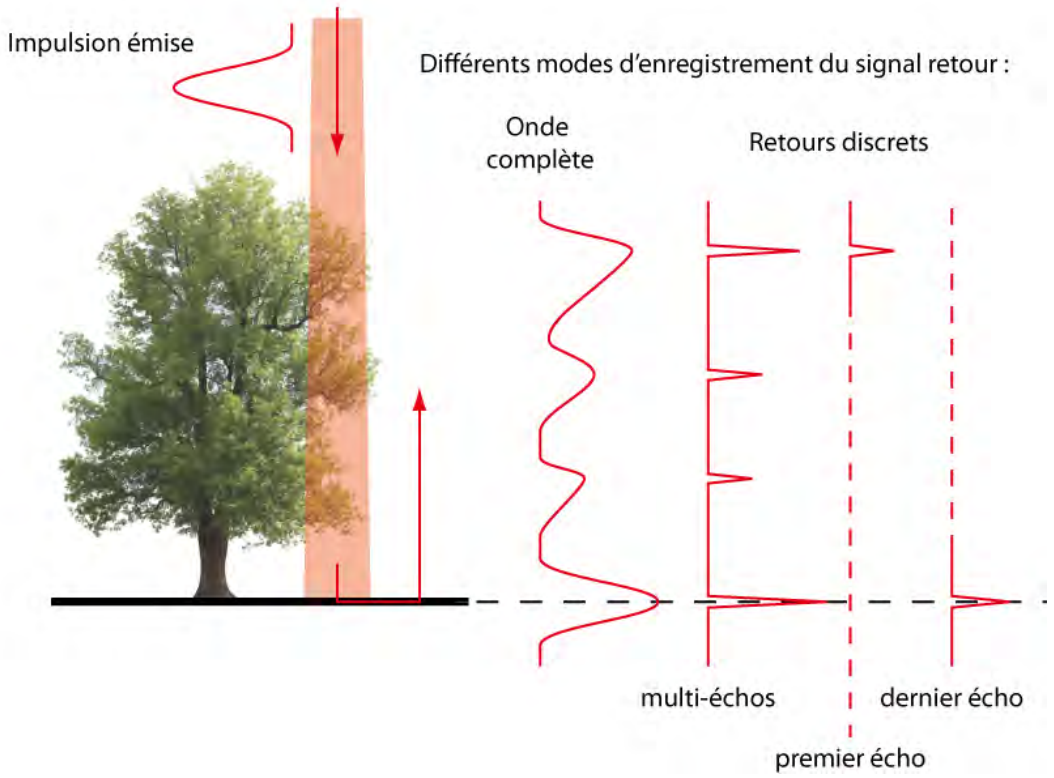


Figure 1.2 – *Illustration des différents modes d'enregistrement du signal lidar réfléchi.*

Là encore, une fois que l'énergie lumineuse réfléchie vers le capteur a été mesurée, il existe plusieurs manières d'exploiter l'information qu'elle contient. La première et la plus simple consiste à mesurer le temps écoulé entre l'émission et la réception de l'impulsion laser, et à en déduire une distance dans une direction donnée. On mesure alors la position d'un point dans l'espace pour chaque ligne de visée. Les systèmes fonctionnant de cette manière sont dits « mono-écho » car ils enregistrent un seul écho retour et « à retour discret » car ils enregistrent cet écho comme un simple point 3D, parfois accompagné d'une mesure d'intensité du signal retour. Dans certains cas, et en particulier en présence d'une géométrie complexe telle qu'un feuillage, le signal lumineux réfléchi n'est pas constitué d'un unique écho, et l'aspect du signal retour peut différer de celui de l'impulsion envoyée. Pour cette raison, certains systèmes précisent « premier écho », « dernier écho » ou « multi-échos » lorsqu'ils sont capables d'enregistrer plusieurs échos retour.

Aujourd'hui, la plupart des scanners laser fournissent une information du type retours discrets et multi-échos. Le scan d'une scène fournit donc un nuage de points 3D, chaque point étant souvent accompagné de la mesure d'intensité de l'écho lidar. Les données fournies par ce type d'instruments sont d'ores et déjà très riches, pourtant l'assimilation du signal lumineux mesuré à une série de points peut s'avérer plutôt réductrice. Pour cette raison, un pas supplémentaire dans la restitution de l'information contenue dans le signal lumineux réfléchi a été réalisé : les systèmes « onde complète » permettent d'enregistrer la forme originale du signal lidar à une fréquence d'échantillonnage de l'ordre du giga-hertz (*Ullrich et Pfennigbauer (2011)*). Les différents types de mode d'enregistrement du signal lumineux réfléchi sont illustrés sur la figure 1.2.

S'ils ont été conçus à l'origine pour la bathymétrie (*Guenther* et al. *(2000)*), les systèmes lidar onde complète s'illustrent dans d'autres domaines, et en particulier pour l'étude de la végétation. En effet, la rétrodiffusion d'une impulsion laser dans un couvert végétal est à l'origine d'une importante déformation des échos lidar.

1.2.2 Exemples de systèmes existants

A titre d'exemple, nous donnons ici les caractéristiques techniques de quelques systèmes lidar spatiaux, aéroportés et terrestres.

La mission spatiale IceSat

La mission IceSat (2003-2010) de l'agence spatiale américaine (NASA) reste à ce jour la seule mission spatiale ayant embarqué un système lidar pour l'observation des surfaces continentales. L'instrument GLAS (Geoscience Laser Altimeter System) a pu fournir une grande quantité de données pour la glaciologie, l'océanographie ainsi que pour l'étude des surfaces continentales, ceci malgré de nombreux problèmes techniques liés au fonctionnement des lasers dans l'espace.

Table 1.1 – *Caractéristiques techniques du lidar GLAS. Sources :* `http://icesat.gsfc.nasa.gov/icesat/glas.php`, *Mallet (2010)*

GLAS (Mission IceSat) Geoscience Laser Altimeter System	NASA Earth Science Enterprise (2003 - 2010)	
Type d'instrument : Spatial	**Distance typique d'observation** : 600 km	
émission LASER	**Divergence** : 87.5 µrad	**Diamètre typique d'empreinte** : 70 m
	Longueur d'onde : 1064 nm (laser Nd:YAG)	**Energie par impulsion** : 74mJ **Durée impulsion** : 6 ns
	Fréquence de répétition : 40 Hz	
Balayage	**Mécanisme** : mouvement de la plateforme uniquement	
	Espacement des mesures : 170 m (direction de déplacement) - 2.5 km à 15km (perpendiculairement)	
	Angles de scan max. : visée nadir uniquement	**Résolution angulaire** : N.A.
FW	**Fréquence de numérisation** : 1 GHz	**Précision en distance** : 5 à 20 cm

Les caractéristiques techniques de l'instrument GLAS sont données dans la table 1.1. Le système possède en fait deux sources laser à des longueurs d'onde de 532nm et 1064nm, mais seule la dernière est utilisable pour l'étude de la végétation. Grâce à sa grande taille d'empreinte au sol, GLAS a permis de mener de nombreuses études des couverts végétaux (*Miller* et al. *(2011)*, *Simard* et al. *(2011)*, *Duncanson* et al. *(2010)*). Cependant, un tel système spatial, s'il permet de couvrir la quasi totalité du globe (jusqu'à des latitudes de plus ou moins 86°), reste peu adapté à la cartographie d'une zone forestière limitée, les empreintes laser successives étant espacées de 170m le long de la trace au sol du satellite,

et de plusieurs kilomètres perpendiculairement à celle-ci (2.5km aux latitudes maximales et 15km à l'équateur). Le système GLAS possède aussi la particularité de disposer d'un système de traitement en temps réel des signaux onde complète lui permettant de réaliser une première classification à bord du satellite. Les retours onde complète sont assimilés à des échos Gaussiens dont les paramètres servent à la classification (*Brenner* et al. *(2003)*).

Le simulateur aéroporté LVIS

Le scanner laser aéroporté LVIS (Land, Vegetation and Ice Sensor) a été développé par la NASA afin de servir de démonstrateur et de plateforme de test pour de futures missions spatiales. Les caractéristiques de l'instrument sont données dans la table 1.2.

Table 1.2 – *Caractéristiques techniques du lidar LVIS. Sources :* `http://lvis.gsfc.nasa.gov/`, *Mallet (2010),Jutzi et Stilla (2006)*

LVIS		NASA Goddard Space Flight Center (1997 -)
Land, Vegetation and Ice Sensor		
	Type d'instrument : Aéroporté	**Distance typique d'observation** : 5 km
émission LASER	**Divergence** : 8 mrad	**Diamètre typique d'empreinte** : 40 m
	Longueur d'onde : 1064 nm (laser Nd:YAG)	**Energie par impulsion** : 5 mJ **Durée impulsion** : 10 ns
	Fréquence de répétition : 100 à 500 Hz	
Balayage	**Mécanisme** : mouvement de la plateforme et miroir oscillant	
	Espacement des mesures : 40m à une altitude de 5 km	
	Angles de scan max. : +7° à -7° (latéralement)	**Résolution angulaire** : 8 mrad
FW	**Fréquence de numérisation** : 0.5 GHz	**Précision en distance** : 30 cm

C'est la conception du scanner LVIS comme un démonstrateur pour missions spatiales qui explique ses caractéristiques particulières (par rapport aux instruments des sections suivantes). LVIS possède en effet une très grande empreinte au sol, et un angle de scan relativement faible. Malgré cela, le scanner LVIS a acquis de nombreux jeux de données dont certains sont disponibles en ligne. Ils ont permis de démontrer l'utilité du lidar onde complète pour l'étude des couverts végétaux et pour la mesure de topographie sous couvert végétal (*Blair* et al. *(1999)*).

Scanners laser aéroportés commerciaux

Depuis 2004 avec le LiteMapper-5600 (*Hug* et al. *(2004)*), des fabricants comme Riegl, Optech, Leica ou encore AHAB commercialisent des scanners laser aéroportés onde complète opérationnels. Les tables 1.3, 1.4 et 1.5 donnent les caractéristiques de trois systèmes parmi les plus récents.

Les différents systèmes présentent des caractéristiques proches, avec des longueurs d'onde laser dans l'infrarouge pour des raisons de sécurité oculaire. Notons également que chacun

Table 1.3 – *Caractéristiques techniques du scanner laser aéroporté Riegl LMS-Q680i. Source :* `http://www.geo-matching.com/`, `http://www.riegl.com/`

LMS - Q680i Riegl Laser Measurement Systems (2010)

Type d'instrument : Aéroporté **Altitude de vol :** 30 à 1600 m

émission LASER
- **Divergence :** 0.5 mrad **Diamètre typique d'empreinte :** 50 cm @ 1 km
- **Longueur d'onde :** 1550 nm (diode laser) **Energie par impulsion :** ? **Durée impulsion :** 9 ns
- **Fréquence de répétition :** 80 à 400 kHz (technologie «multiple pulses in the air»)

Balayage
- **Mécanisme :** mouvement de la plateforme et polygone rotatif
- **Espacement des mesures :** 4 cm latéralement à une altitude de 1 km
- **Angles de scan max. :** +30° à -30° (latéralement) **Résolution angulaire :** 40 µrad

FW
- **Fréquence de numérisation :** 1 GHz **Précision en distance :** ?

Table 1.4 – *Caractéristiques techniques du scanner laser aéroporté Leica ALS70 - HP . Source :* `http://www.geo-matching.com/`, `www.leica-geosystems.fr`

ALS70 - HP Leica Geosystems AG (2011)

Type d'instrument : Aéroporté **Altitude de vol :** 200 à 3500 m

émission LASER
- **Divergence :** 0.22 mrad **Diamètre typique d'empreinte :** 22cm @ 1 km
- **Longueur d'onde :** 1064 nm (laser Nd:YAG) **Energie par impulsion :** ? **Durée impulsion :** 15 ns
- **Fréquence de répétition :** 40 à 500 Hz (technologie «multiple pulses in the air»)

Balayage
- **Mécanisme :** mouvement de la plateforme et miroir oscillant
- **Espacement des mesures :** 30 cm latéralement à une altitude de 1 km
- **Angles de scan max. :** +37.5° à -37.5° (latéralement) **Résolution angulaire :** 0.3 mrad

FW
- **Fréquence de numérisation :** 1 GHz **Précision en distance :** 1 cm

de ces systèmes permet de travailler en mode « multiple pulses in the air » (littéralement, « plusieurs impulsions en vol »). Les fabricants donnent peu d'informations relatives au fonctionnement précis de cette technique, qui peut permettre d'atteindre une meilleure rapidité d'acquisition, en émettant une impulsion laser alors que la précédente n'a pas encore été mesurée, ou encore d'accumuler les retours provenant de plusieurs impulsions successives afin d'améliorer le rapport signal à bruit, ou la distance maximale observable. C'est sans doute également la volonté de protéger leur propriété industrielle qui explique que certaines

Table 1.5 – *Caractéristiques techniques du scanner laser aéroporté Optech ORION C ALTM. Source :* `http://www.geo-matching.com/`, `http://www.optech.ca/`

Orion C ALTM — **Optech** — **(2012)**

Type d'instrument : Aéroporté — **Altitude de vol :** 50 à 1000 m

émission LASER

Divergence : 0.25 mrad — **Diamètre typique d'empreinte :** 25 cm @ 1 km

Longueur d'onde : 1541 nm (diode laser) — **Energie par impulsion :** ? — **Durée impulsion :** ?

Fréquence de répétition : 50 à 300 kHz (technologie «multiple pulses in the air»)

Balayage

Mécanisme : mouvement de la plateforme et miroir oscillant

Espacement des mesures : 5 cm latéralement à une altitude de 1 km

Angles de scan max. : +25° à -25° (latéralement) — **Résolution angulaire :** 50 µrad

FW

Fréquence de numérisation : 1 GHz — **Précision en distance :** 2 cm

informations telles que les énergies des impulsions laser ne sont pas communiquées par les fabricants.

Les différents systèmes se démarquent également de par le mécanisme de balayage employé. La figure 1.3 illustre différents mécanismes possibles (*Wehr et Lohr (1999)*) :

- Miroir oscillant : le faisceau laser incident est réfléchi sur un miroir dont l'inclinaison varie au cours du temps. L'avancée de l'aéronef produit le déplacement dans l'autre direction. Ce système est à l'origine d'un motif au sol « en zig-zag ». Une ligne de scan est réalisée de gauche à droite, et la suivante de droite à gauche. Cette méthode de balayage est la plus simple à mettre en œuvre mais peut engendrer des difficultés de mesure de l'orientation précise du miroir, particulièrement en bout de course où des oscillations non maîtrisées peuvent se produire.
- Polygone rotatif : en utilisant un polygone dont chaque face est un miroir, on produit un motif formé de lignes parallèles. Ce système est également assez simple dans sa mise en œuvre mais offre une meilleure maîtrise que le miroir oscillant, tout en s'affranchissant des effets de bout de course.
- Système à fibres : une autre technique consiste à envoyer le faisceau laser dans une série de fibres optiques orientées de sorte à réaliser un motif quelconque. Cette technique peu courante est par exemple utilisée dans les scanners TopoSys.
- Système de Palmer : un miroir en mouvement de nutation produit un motif de balayage elliptique. Ce système est utilisé sur les lidars bathymétriques AHAB (`http://www.airbornehydro.com/`)

Scanners laser terrestres

La version terrestre des scanners laser sort du contexte de notre étude, exclusivement tournée vers les lidars aéroportés. Pourtant, il est intéressant de connaître l'existence de ce type de systèmes et de leurs caractéristiques. Nous donnons ici les fiches techniques de deux

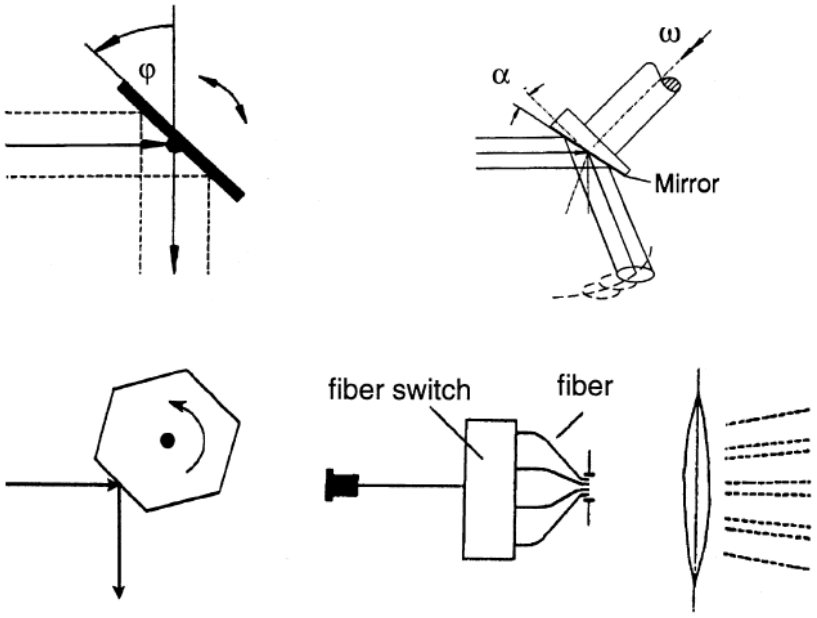


Figure 1.3 – *Différents mécanismes de balayage pour les scanners laser aéroportés. De gauche à droite et de haut en bas : miroir oscillant, système de Palmer, polygone rotatif, système à fibres. Image tirée de Wehr et Lohr (1999).*

systèmes bien différents.

Le Focus3D de FARO (table 1.6) est un télémètre laser basé sur la mesure de distance par différence de phase. Il ne permet donc pas de fournir une mesure onde complète, et possède une distance maximale d'acquisition très limitée (160m contre 1400m pour le Riegl VZ-1000 qui procède par mesure de temps de vol). Cette technique lui permet par contre de réaliser des mesures un peu plus précises (2mm contre 5mm pour le VZ-1000) et avec une fréquence de répétition bien supérieure (976kHz contre 300kHz pour le VZ-1000).

Le Riegl VZ-1000 (table 1.7) s'illustre quant à lui comme l'un des tout premiers systèmes terrestres proposant l'enregistrement du retour onde complète. Les systèmes à retour d'onde complète perdent en effet leur intérêt lorsque la taille de l'empreinte laser reste limitée (car la variété des surfaces diffusantes à l'intérieur du faisceau laser est du même coup plutôt restreinte). La capacité du VZ-1000 à observer des cibles jusqu'à une distance de 1400m (d'après les spécifications fournies par le fabricant), laisse imaginer un intérêt pour la technologie onde complète, puisqu'à une telle distance la tâche laser aurait un diamètre de 42cm.

Le VZ-1000 est également cité ici car c'est le système qui a été acquis par l'ONERA dans le cadre du projet LIMA, et que nous utiliserons par la suite (voir section 6.4).

1.3 Applications

1.3.1 La particularité de la végétation

En raison de la capacité des impulsions laser à traverser tout ou partie des couverts végétaux, les systèmes lidar ont très rapidement trouvé des applications en écologie forestière. Déjà, les systèmes multi-échos à retour discret ont permis de mesurer la hauteur et le diamètre des couronnes d'arbres individuels (*Persson* et al. *(2002)*), d'estimer les caractéristiques de

Table 1.6 – *Caractéristiques techniques du scanner laser terrestre FARO Focus3D. Source :* `http://www.geo-matching.com/`, `http://www.faro.com`

Focus3D — FARO — (2010)

Type d'instrument : Terrestre — **Distance d'observation** : 60 m à 120 m

émission LASER
- **Divergence** : 0.19 mrad — **Diamètre typique d'empreinte** : 1.9 cm @ 100 m
- **Longueur d'onde** : 905 nm (diode laser) — **Energie par impulsion** : ? — **Durée impulsion** : ?
- **Fréquence de répétition** : 976 kHz

Balayage
- **Mécanisme** : miroir rotatif
- **Espacement des mesures** : 1.6 cm @ 100m — **Résolution angulaire** : 0.16 mrad
- **Angles de scan max.** : 360° horizontalement - 300° verticalement

Mesure de distance par différence de phase — **Précision en distance** : 2 mm

Table 1.7 – *Caractéristiques techniques du scanner laser terrestre Riegl VZ-1000 . Source :* `http://www.geo-matching.com/`, `http://www.riegl.com/`

VZ - 1000 — Riegl Laser Measurement Systems — (2010)

Type d'instrument : Terrestre — **Distance d'observation** : **2.5 m à 1400 m**

émission LASER
- **Divergence** : 0.3 mrad — **Diamètre typique d'empreinte** : 30 cm @ 1 km
- **Longueur d'onde** : 1550 nm (diode laser) — **Energie par impulsion** : ? — **Durée impulsion** : ?
- **Fréquence de répétition** : 300 kHz (technologie «multiple pulses in the air»)

Balayage
- **Mécanisme** : polygone rotatif et tête rotative
- **Espacement des mesures** : 4.2 cm @ 1 km — **Résolution angulaire** : 42 µrad
- **Angles de scan max.** : 360° horizontalement - 100° verticalement

FW
- **Fréquence de numérisation** : 0.5 GHz — **Précision en distance** : 5 mm

différentes essences d'arbres (*Andersen* et al. *(2005)*), de détecter les arbres abattus (*Yu* et al. *(2004)*) ou encore d'estimer à plus grande échelles les paramètres d'une zone de forêt (*Means* et al. *(1999)*).

L'avènement de la technologie onde complète a alors permis d'étudier plus en détail la structure verticale des couverts végétaux. Tout d'abord grâce aux systèmes expérimentaux de la NASA (*Dubayah et Drake (2000)*, *Lefsky* et al. *(2002)*, *Reutebuch* et al. *(2005)*), puis grâce à des moyens toujours plus nombreux et variés, de nombreuses caractéristiques des

zones forestières ont pu être étudiées. Citons par exemple :

- **La hauteur de canopée** (*Lefsky* et al. *(1999a)*, *Kimes* et al. *(2006)*, *Rosette* et al. *(2008)*) : elle est estimée par la différence entre l'altitude des premiers et des derniers échos pour des forêts tempérées, boréales et tropicales. Les systèmes lidar à petite empreinte (de diamètre inférieur à 1m) montrent leurs limites pour l'estimation de ce paramètre. En effet, les sommets des arbres sont souvent absents des mesures, ce qui provoque en général une sous-estimation d'au moins 1m (*Dubayah et Drake (2000)*). On aurait donc plutôt tendance à privilégier les systèmes à plus grande empreinte (2m à 70m) comme LVIS ou GLAS pour estimer ce paramètre.
- **Paramètres des arbres individuels** : les diamètres des couronnes des arbres peuvent être estimés à partir des nuages de points 3D (*Reitberger* et al. *(2009)*, *Reitberger (2010)*). Il est ensuite possible, grâce à des relations allométriques, d'estimer les diamètres des troncs (*Lefsky* et al. *(1999b)*), ou encore le volume total de bois (*Means* et al. *(1999)*), ou même de détecter les troncs individuellement grâce à des données acquises en visée inclinée (*Reitberger* et al. *(2007)*). Ces applications sont particulièrement appréciées dans le cadre de la gestion des stocks de bois. Enfin, l'addition des informations contenues dans le signal lidar onde complète a permis d'obtenir des résultats intéressants pour la classification des différentes espèces d'arbres (*Neuenschwander* et al. *(2009)*, *Reitberger* et al. *(2008)*).
- En combinant les mesures de hauteur de canopée et la connaissance, a priori ou déduite, des espèces d'arbres présentes, il a été possible d'estimer la quantité de **biomasse** présente au dessus du sol. La corrélation entre hauteur de canopée et biomasse a été démontrée en forêts de feuillus, de conifères, en zones de montagne ainsi qu'en forêts denses, boréales et tropicales (*Drake* et al. *(2002)*, *Hyde* et al. *(2005)*).

D'une manière générale, l'utilisation d'un scanner laser aéroporté à petite empreinte conduit, comme nous l'avons signalé, à des erreurs d'estimation de la hauteur de canopée, en raison de la possibilité pour les petites empreintes de manquer le sommet des arbres. Si ce type d'instrument sera préféré pour les applications visant à identifier des arbres individuels, on aura par contre tendance à privilégier un instrument à plus grande empreinte, que ce soit un scanner aéroporté volant à plus haute altitude, comme LVIS, ou un instrument spatial comme GLAS pour l'étude des propriétés globales des zones forestières. Notons toutefois que ces derniers présentent un inconvénient notable en présence d'une forte pente, comme c'est le cas dans les régions montagneuses. Il est en effet alors possible que la partie la plus haute du couvert végétal soit située à la même altitude qu'une partie du terrain, et ce à l'intérieur de la même empreinte lidar. Il se produit alors un phénomène de mélange entre l'écho provenant du sol et celui provenant de la végétation, phénomène qui nuit à la qualité des algorithmes d'inversion. C'est en partie pour cette raison que les systèmes onde complète ont été introduits afin de fournir des informations permettant d'améliorer les classifications sol / végétation.

1.3.2 Topographie et végétation

Avec l'imagerie stéréoscopique et le radar à synthèse d'ouverture, le lidar, et plus particulièrement le scanner laser aéroporté est l'une des plus importantes sources de données topographiques. Grâce aux importantes densités de points 3D fournies par les instruments aéroportés, il est possible de produire des modèles numériques de terrain (MNT) à des résolutions inférieures au mètre. Citons par exemple le projet Litto3D conduit en France par l'IGN (Institut National de l'information Géographique et forestière) et le SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) qui a permis de produire un modèle

numérique de terrain des zones côtières françaises avec une résolution de 1m.

Le scanner laser aéroporté présente plusieurs avantages pour la topographie, particulièrement en zones côtières et forestières. Grâce au pouvoir de pénétration des impulsions laser dans les milieux diffus et poreux, le lidar permet en effet d'obtenir des informations topographiques sous la surface de l'eau ou sous les couverts végétaux. C'est à cette dernière application que nous allons nous intéresser plus particulièrement.

En présence de végétation, les scanners aéroportés de type mono-écho ou multi-échos permettent certes de mettre en œuvre quelques techniques de séparation sol / végétation basées sur les échos multiples ainsi que sur la géométrie 3D des nuages de points (*Kraus et Pfeifer (1998)*, *Zhang* et al. *(2003)*), mais ils montrent rapidement leurs limites et cèdent la place aux systèmes onde complète. La rétro-diffusion de l'impulsion laser par les feuilles dispersées dans l'espace produit un écho retour déformé, le plus souvent élargi et asymétrique. L'utilisation de cette déformation des échos lidar par la réflexion sur les couverts végétaux permet d'améliorer significativement les reconstructions.

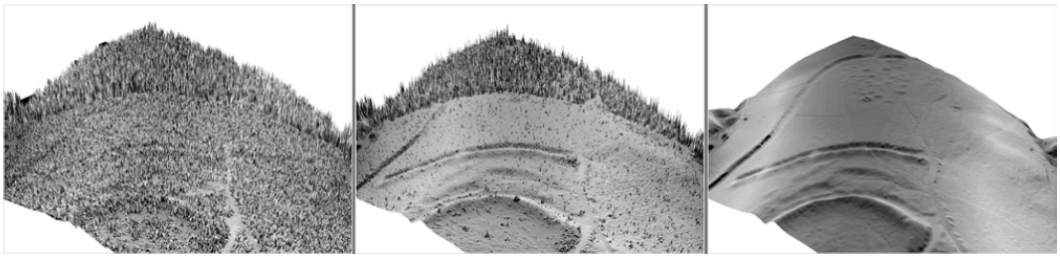


Figure 1.4 – *Exemple de reconstruction de MNT en présence de végétation. A gauche, modèle de surface reconstruit en utilisant tous les échos. On reconnait une zone de végétation basse en premier plan, et une zone de végétation haute en arrière plan. Au centre, modèle de surface reconstruit en utilisant uniquement les derniers échos. De nombreuses erreurs subsistent. A droite, les données ont été filtrées grâce à l'élargissement des échos. Source : Doneus et Briese (2006)*

Un scanner laser aéroporté onde complète a par exemple été utilisé afin de sonder des sites archéologiques sous une épaisse couche de végétation (*Millard* et al. *(2009)*, *Doneus et Briese (2006)*, *Doneus* et al. *(2008)*, voir figure 1.4). C'est sur cette application que nous allons nous concentrer par la suite.

1.4 Objectif et méthode

L'objectif général de la thèse est l'étude d'un système de mesure, le scanner laser aéroporté de type « onde complète » , et de sa pertinence pour l'observation des couverts végétaux et la pénétration sous feuillage. En effet, si plusieurs techniques ont été développées qui permettent de s'affranchir de la végétation lors de la reconstruction de modèles numériques de terrain, et ainsi de reconstruire la géométrie du sol situé sous les couverts forestiers, l'influence des différents paramètres des systèmes lidar sur la qualité des reconstructions n'a jamais réellement été évaluée. Nous nous proposons donc de mettre en place les outils et méthodes permettant, grâce à la modélisation de la mesure lidar onde complète, de tester différentes configurations d'observation et de quantifier la qualité des résultats obtenus. Nous nous intéresserons en particulier à l'intérêt de combiner des acquisitions réalisées

avec différents angles de visée pour la reconstruction 3D du relief situé sous le couvert végétal.

Le travail de thèse est organisé en deux grandes étapes. Dans la première partie du manuscrit, nous présenterons les outils développés pour la simulation de l'observation d'une forêt synthétique réaliste grâce à un scanner laser aéroporté onde complète. Dans la deuxième partie, nous mettrons en place une méthode de traitement des données lidar onde complète permettant de reconstruire la géométrie du terrain situé sous un couvert végétal, et de combiner pour cela des acquisitions réalisées sous différents points de vue. Comme le montre la figure 1.5, le modèle développé dans la première partie sera utilisé pour fournir les simulations nécessaires à l'élaboration de la deuxième partie.

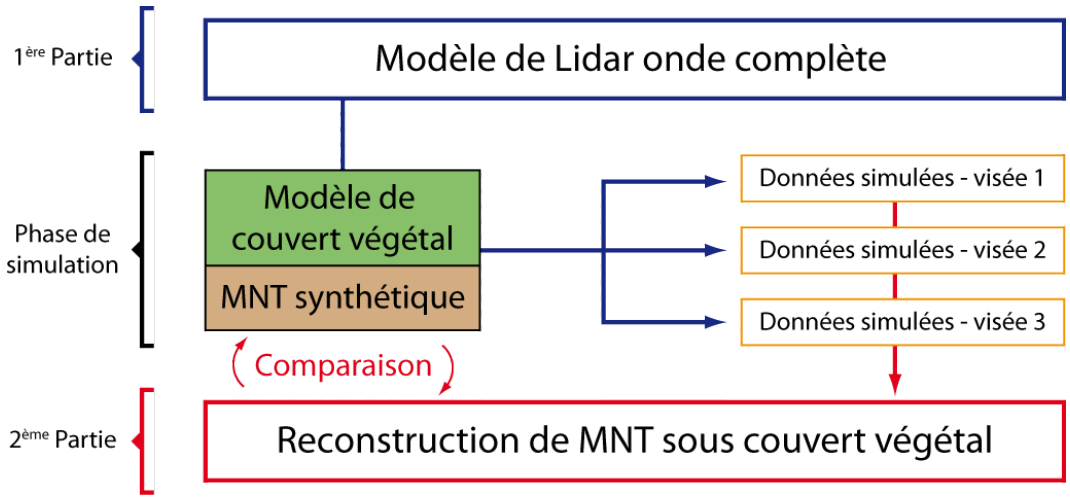


Figure 1.5 – *Organisation du travail de thèse en deux étapes. Modélisation du lidar onde complète, puis traitement des données pour la reconstruction des modèles numériques de terrain sous couvert végétal. Une phase intermédiaire de simulation permet de se doter de jeux de données lidar avec une connaissance parfaite du MNT et du couvert végétal.*

1.4.1 Première partie : modéliser la mesure lidar onde complète

La première partie de la thèse (chapitres 2 à 6) est consacrée au développement et à la validation d'un nouveau modèle de lidar onde complète adapté à notre objectif, et donc à la simulation de signaux sur des scènes de végétation.

Alors que de nombreux systèmes opérationnels sont commercialisés depuis plusieurs années, il peut paraître étrange de chercher à se doter d'un modèle permettant de simuler la mesure lidar onde complète. Pourtant, le développement d'un modèle sert de nombreux intérêts.

En premier lieu, une analyse technologique des instruments distribués dans le commerce montre que la plupart ont été développés pour des applications limitées, souvent pour la topographie. Pour cette raison, et bien que la technologie lidar, en particulier sous sa déclinaison onde complète, possède un très fort potentiel, les systèmes existants sont rarement optimisés pour des applications plus exigeantes comme la caractérisation des couverts végétaux. Se doter d'un modèle permettant de reproduire le comportement d'instruments existants, mais également d'ajuster à volonté tous les paramètres du système (altitude de vol, dimension de l'empreinte laser, longueur d'onde laser, etc...) est donc un outil très intéressant permettant

de concevoir à l'avenir des systèmes lidar dédiés et optimisés pour des applications bien précises.

D'autre part, un modèle permet, à moindre coût, de générer des jeux de données qui pourront servir de tests aux méthodes d'exploitation des données lidar. Un problème récurrent dans le développement de méthodes d'exploitation de données est la difficulté d'établir une vérité terrain qui permette de juger de leurs performances. Grâce aux modèles, on dispose d'une parfaite connaissance de la scène observée. Le problème de la vérité terrain se trouve par contre déplacé en ceci que la validation d'un modèle de lidar onde complète sur des scènes de végétation peut sembler quasi-impossible. Il est en effet très compliqué de disposer d'un modèle de végétation représentant parfaitement une scène réelle précise.

Enfin, le développement d'un modèle permettant de simuler la mesure nécessite une interrogation poussée sur les phénomènes physiques mis en jeu et permet donc de bien comprendre les mécanismes de la mesure. Dans le cadre de la thèse, développer un modèle nouveau à partir d'une feuille quasiment blanche a permis de bien cerner les grandeurs et phénomènes impactant de manière significative la génération du signal lidar, et a été la source de nombreuses idées.

Notre intérêt pour la simulation numérique dans la thèse s'inscrit dans les deux dernières catégories. Un modèle nous permettra de bien comprendre les particularités de la mesure lidar onde complète, de disposer de données afin de concevoir et de tester une technique de reconstruction de modèle numérique de terrain sous couvert végétal, et également de juger de la qualité des reconstructions obtenues grâce à la connaissance parfaite du relief utilisé dans les scènes modélisées.

1.4.2 Deuxième partie : exploiter les données lidar onde complète

Dans une deuxième partie (chapitre 7 à 9), nous avons mis en place une chaîne de traitement des données permettant, à partir de jeux de données lidar onde complète aéroportés, de reconstruire un modèle numérique de terrain malgré l'occultation de ce dernier par un couvert végétal. Pour parvenir à cet objectif, nous avons travaillé sur plusieurs axes.

Il faut tout d'abord extraire l'information pertinente des signaux lidar onde complète. Pour cela, nous avons utilisé un nouveau modèle de décomposition des signaux qui permet de tirer parti de la forme caractéristique des échos provenant de la végétation.

Vient ensuite la classification des échos lidar. Dans notre cas, nous avons cherché à séparer les échos provenant du sol, donc nous intéressant prioritairement, des échos provenant de la végétation, que nous souhaitons écarter (dans le cadre de notre étude). Pour cela, nous proposons une méthode de classification non supervisée, donc présentant l'avantage de s'affranchir de l'apprentissage préliminaire inhérent aux méthodes supervisées utilisées plus couramment.

Nous montrerons ensuite comment reconstruire un modèle numérique de terrain à partir des informations extraites, et nous pourrons évaluer l'intérêt de la combinaison de plusieurs angles de visée.

La méthode de traitement des données lidar onde complète mise en place sera être testée grâce à des jeux de données issus de simulations et pour lesquels nous disposerons d'une connaissance parfaite du MNT ainsi que du couvert végétal.

Première partie

Modéliser la mesure lidar onde complète

Chapitre 2

Modélisation physique de la mesure lidar onde complète

Sommaire

2.1 Introduction **27**
2.2 Emission laser **28**
2.2.1 Aspects temporels 28
2.2.2 Aspects spatiaux 30
2.2.3 Aspects spectraux 31
2.2.4 Bilan 31
2.3 Propagation de l'impulsion émise **31**
2.3.1 Propagation dans le vide 31
2.3.2 Propagation dans l'atmosphère 31
2.4 Interaction avec la scène **33**
2.4.1 Surfaces planes : BRDF / BTDF 33
2.4.2 Expression générale de la luminance réfléchie 33
2.5 Collection, amplification et numérisation du signal **34**
2.5.1 Collection de la luminance réfléchie 34
2.5.2 Mesure et enregistrement du signal 35

2.1 Introduction

Avant d'entreprendre la simulation et l'exploitation des données lidar onde complète, il convient de bien comprendre les phénomènes physiques mis en jeu lors de la mesure. Dans ce chapitre, nous passons en revue les différentes étapes de la mesure onde complète, depuis l'émission d'une impulsion laser, jusqu'à la numérisation du signal retour. Ce faisant, nous aborderons chaque étape à un niveau de simplification équivalent à celui qui sera adopté plus tard dans la simulation de la mesure. Ce chapitre n'a donc pas vocation à faire référence de manière détaillée à chaque étape de génération du signal lidar, mais plutôt à donner un tableau général des notions qui seront abordées ensuite, et à introduire les concepts et notations qui seront utilisés dans le reste du manuscrit. Les différents phénomènes mis en jeu et qui seront abordés dans ce chapitre sont illustrés sur la figure 2.1.

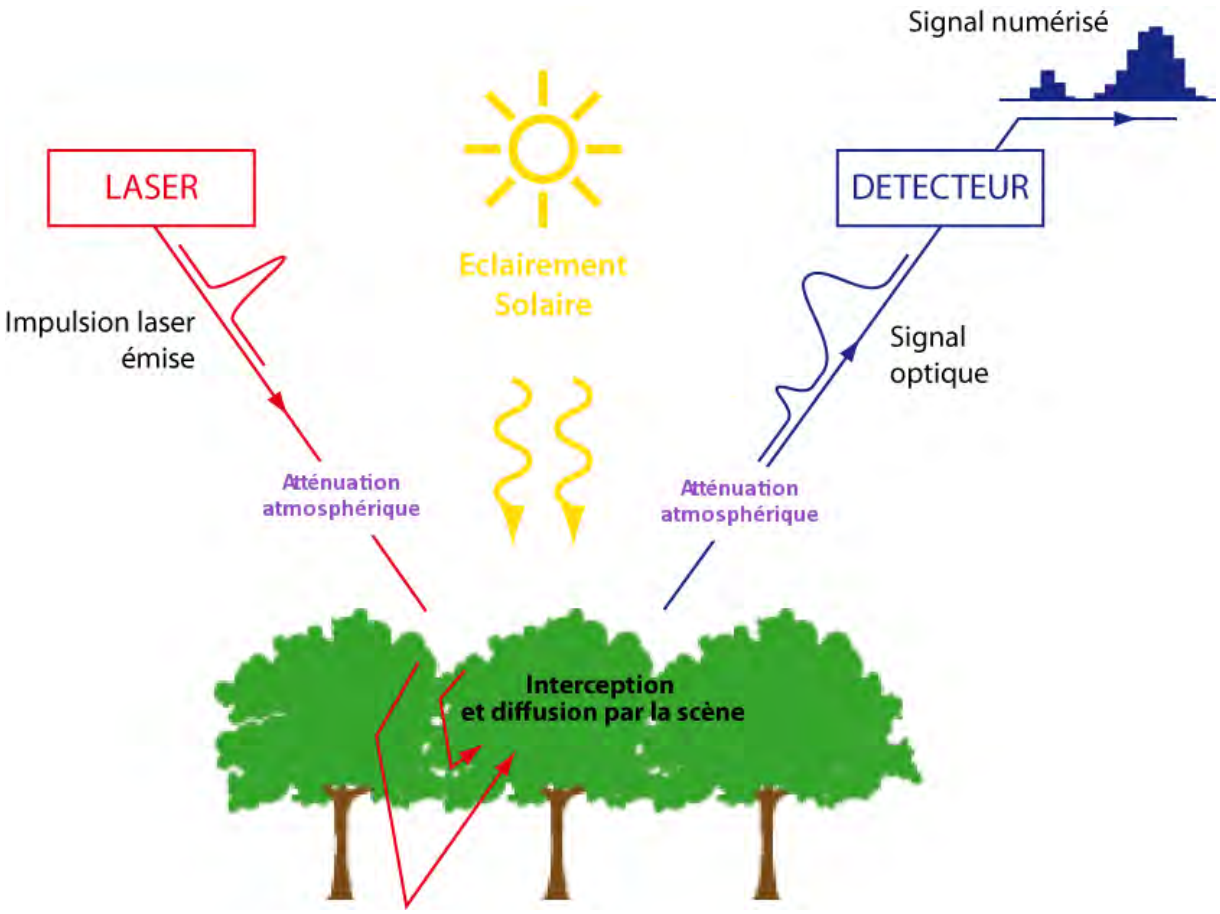


Figure 2.1 – *Schéma de principe de la mesure lidar onde complète reprenant les différents phénomènes abordés dans le chapitre 2.*

Après avoir posé les notations nécessaires à la description de l'émission d'un laser à impulsions, nous nous intéresserons de manière simplifiée à la propagation de l'impulsion laser jusqu'à la rencontre d'un obstacle matériel. L'interaction entre le rayonnement lumineux et l'objet illuminé sera alors décrite d'un point de vue macroscopique. Enfin, nous aborderons le problème de la mesure du signal réfléchi vers le capteur du lidar, de son amplification et de sa numérisation.

2.2 Emission laser

2.2.1 Aspects temporels

Le premier élément du lidar est sa source laser. Les lasers sont des sources de lumière spatialement et spectralement cohérentes. Utilisés pour le lidar onde complète, ils permettent d'émettre des impulsions de plusieurs millijoules très brèves (quelques nanosecondes) dans un faisceau de divergence très faible (quelques dixièmes de milliradians). Dans cette partie, on s'intéresse uniquement aux lasers dits « pulsés », c'est à dire émettant des impulsions, par opposition aux lasers émettant en continu. Dans le cas du lidar, les lasers utilisés sont le plus souvent des lasers à fibre dopée ($\lambda = 1550$nm), ou des lasers à cristal solide comme le Nd :YAG ($\lambda = 1064$nm) (*Koechner (2006)*).

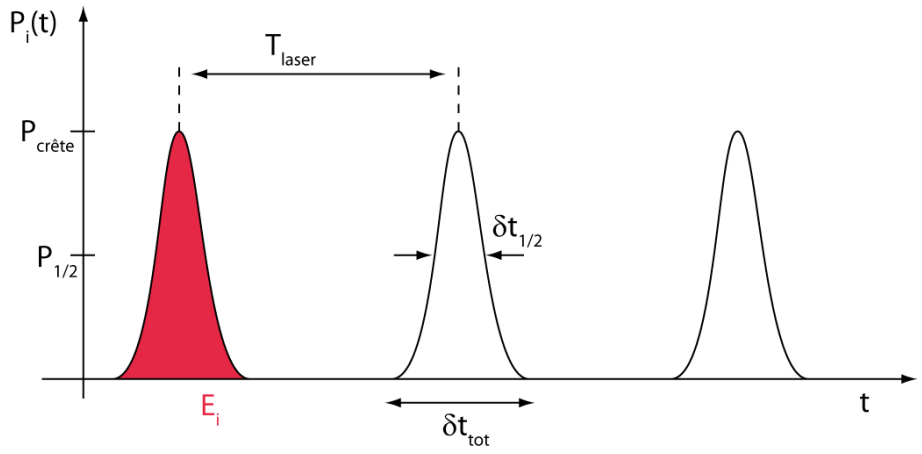


Figure 2.2 – *Séquence d'impulsions laser et définition des paramètres principaux d'une émission laser pulsée.*

Considérons une source laser pulsée émettant des impulsions d'énergie totale E_i avec une fréquence de répétition f_{laser} (soit avec une période $T_{laser} = \frac{1}{f_{laser}}$). On définit la puissance moyenne du laser P_{moy} par la relation :

$$P_{moy} = \frac{E_i}{T_{laser}} = E_i \times f_{laser} \qquad [\mathrm{W}] \tag{2.2.1}$$

On considère généralement que l'impulsion laser émise est de forme Gaussienne (*Svelto (2010)*). On peut donc écrire la puissance instantanée émise au cours du temps :

$$P_i(t) = P_{crête} e^{-\frac{t^2}{2\sigma}} \qquad [\mathrm{W}] \tag{2.2.2}$$

où $P_{crête}$ est la puissance crête du laser, c'est à dire la puissance instantanée maximale atteinte lors de l'émission de l'impulsion, et σ l'écart type de la distribution Gaussienne. On réécrit souvent cette expression en introduisant la durée de l'impulsion à mi-hauteur $\delta t_{1/2}$:

$$P_i(t) = P_{crête} e^{-4\ln(2)\left(\frac{t}{\delta t_{1/2}}\right)^2} \qquad [\mathrm{W}] \tag{2.2.3}$$

En intégrant la relation 2.2.3 sur la durée de l'impulsion, on trouve :

$$P_{crête} = 0.88 \frac{E_i}{\delta t_{1/2}} \qquad [\mathrm{W}] \tag{2.2.4}$$

On caractérise généralement les sources laser pulsées par les trois paramètres $\delta t_{1/2}$, f_{laser} et P_{moy}. On en déduit ensuite l'énergie totale de l'impulsion E_i grâce à l'équation 2.2.1 et la puissance crête $P_{crête}$ grâce à l'équation 2.2.4.

Toujours dans le cas de l'impulsion laser Gaussienne, on définit la largeur totale de l'impulsion laser comme :

$$\delta t_{tot} = 3\delta t_{1/2} \qquad [\mathrm{s}] \tag{2.2.5}$$

Cette définition permet de tronquer l'impulsion laser Gaussienne sur un support fini tel que la représentation tronquée conserve plus de 99.9% de l'énergie totale de l'impulsion. Ces définitions sont résumées sur la figure 2.2.

2.2.2 Aspects spatiaux

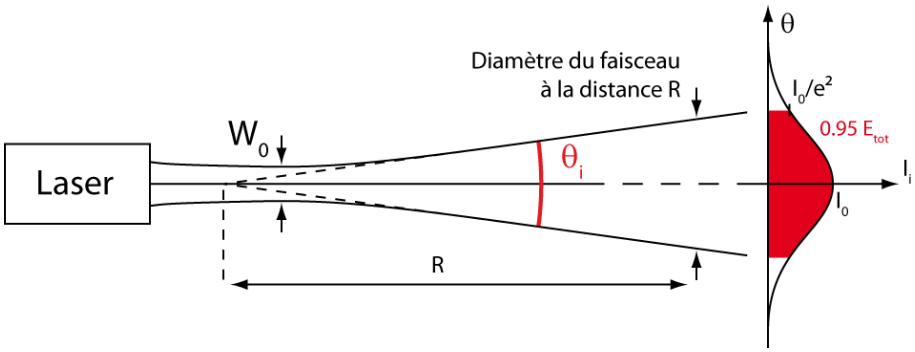


Figure 2.3 – *Faisceau laser Gaussien : définition des paramètres principaux.*

Le faisceau d'un laser possède l'avantage de pouvoir être très collimaté. Cependant, la seule diffraction en sortie du laser induit une divergence et donne au faisceau laser une forme conique dont le demi-angle au sommet peut s'écrire :

$$\theta_{1/2} = \frac{\theta_i}{2} = M^2 \frac{\lambda}{\pi W_0} \qquad [\text{rad}] \tag{2.2.6}$$

où M^2 est le facteur de qualité du faisceau laser, λ la longueur d'onde et W_0 le diamètre de la pupille de sortie du laser. Dans le cas des sources utilisées pour le lidar, les facteurs de qualité sont très bons (inférieurs à 2), et on peut obtenir des divergences totales de faisceau θ_i de l'ordre de 0.3 à $0.5mrad$, soit des tâches laser de 30 à $50cm$ de diamètre à une distance de $1km$. On considérera par la suite que le faisceau laser émis a une forme conique, ce qui constitue une hypothèse raisonnable puisque l'on s'intéresse au faisceau laser à grande distance de l'instrument.

Moyennant l'hypothèse d'une petite divergence, on calculera généralement le diamètre de la tâche laser à une distance R comme :

$$D_{faisceau}(R) = \theta_i R \qquad [\text{m}] \tag{2.2.7}$$

On pourra aussi utiliser l'angle solide Ω_i d'émission du laser qui, toujours sous l'hypothèse des petites divergences, peut s'écrire :

$$\Omega_i = \frac{\pi \theta_i^2}{4} \qquad [\text{sr}] \tag{2.2.8}$$

A l'intérieur du cône d'émission du laser, l'intensité émise n'est pas homogène. On suppose couramment qu'elle suit une loi Gaussienne (*Svelto (2010)*). Dans le cas du profil Gaussien, la dépendance de l'intensité laser émise I_i en fonction de l'angle θ formé avec la direction de propagation du faisceau s'écrit :

$$I_i(\theta) = \frac{P_{crête}}{\Omega_i} e^{-8\left(\frac{\theta}{\theta_i}\right)^2} \qquad [\text{W. sr}^{-1}] \tag{2.2.9}$$

On note à ce titre que la divergence totale θ_i du faisceau introduite précédemment est définie comme l'angle θ au delà duquel l'intensité laser émise est inférieure à l'intensité centrale multipliée par le facteur $1/e^2$ (≈ 0.135) ; soit une énergie comprise dans l'angle solide Ω_i représentant environ 95% de l'énergie totale émise. Ces notions sont illustrées sur la figure 2.3.

2.2.3 Aspects spectraux

On considérera que le laser du lidar émet à une longueur d'onde λ avec une largeur de raie suffisamment fine pour que les propriétés des milieux traversés et des surfaces rencontrées puissent être considérées constantes sur cet intervalle spectral.

Par la suite, et pour simplifier les écritures, nous omettrons systématiquement de préciser, sauf si nécessaire, que les grandeurs manipulées sont des grandeurs spectrales. Il sera toujours sous-entendu que nous utilisons les grandeurs correspondant à la longueur d'onde du laser intégré à notre lidar.

2.2.4 Bilan

La combinaison des dépendances temporelle (équation 2.2.3) et spatiale (équation 2.2.9) permet d'exprimer l'intensité émise pendant une impulsion laser :

$$I_i(\theta, t) = \frac{4P_{crête}}{\pi\theta_i^2} e^{-8\left(\frac{\theta}{\theta_i}\right)^2 - 4\ln(2)\left(\frac{t}{\delta t_{1/2}}\right)^2} \qquad [\mathrm{W.\ sr^{-1}}] \tag{2.2.10}$$

On utilisera parfois la puissance totale instantanée $P_{i,\ total}(t)$ délivrée par le laser au cours du temps, obtenue par intégration de $I_i(\theta, t)$ sur l'angle solide d'émission du laser :

$$P_{i,\ total}(t) = \int_\theta \int_\phi I_i(\theta, t) \sin\theta d\theta d\phi \approx 2\pi \int_0^{\theta_i} I_i(\theta, t) \sin\theta d\theta \qquad [\mathrm{W}] \tag{2.2.11}$$

2.3 Propagation de l'impulsion émise

2.3.1 Propagation dans le vide

Considérons une impulsion laser décrite par l'intensité émise $I_i(\theta, t)$ telle que formulée précédemment (voir 2.2.4) et se propageant dans le vide à la vitesse c. Si après avoir parcouru une distance R, le faisceau laser est intercepté par une surface plane homogène $\mathcal{S}$ en incidence normale, l'éclairement total du laser sur la surface $\mathcal{S}$ à l'instant t vaut :

$$E_i(R, t) = \frac{1}{R^2} P_{i,total}\left(t - \frac{R}{c}\right) \qquad [\mathrm{W.\ m^{-2}}] \tag{2.3.1}$$

Si maintenant le vecteur normal $\vec{n}$ à la surface $\mathcal{S}$ forme un angle quelconque avec la direction incidente $\vec{\omega}$ de l'impulsion laser, l'éclairement total sur $\mathcal{S}$ à l'instant t se réécrit :

$$E_i(R, \vec{\omega}, t) = \frac{1}{R^2} P_{i,total}\left(t - \frac{R}{c}\right) \vec{\omega} \cdot \vec{n} \qquad [\mathrm{W.\ m^{-2}}] \tag{2.3.2}$$

2.3.2 Propagation dans l'atmosphère

La propagation d'un faisceau dans l'atmosphère est un problème très complexe. De nombreux phénomènes peuvent en effet influencer la marche de la lumière. La turbulence, les aérosols, etc... sont autant de paramètres qu'il serait très compliqué de prendre en compte de manière précise. Pour des raisons de simplicité de modélisation, nous avons choisi, dans un premier temps, de négliger en partie les phénomènes de diffusion atmosphérique. Ceux-ci seront bien pris en compte dans le calcul de l'atténuation des signaux pendant leur propagation, mais on ne tiendra pas compte de la rétro-diffusion de l'impulsion laser par l'atmosphère, ni de la diffusion de la lumière solaire par l'atmosphère vers le capteur.

On s'intéresse dans notre cas à des distances de l'ordre de plusieurs centaines de mètres, voire de quelques kilomètres. Dans cette situation, l'atténuation atmosphérique n'est pas négligeable.

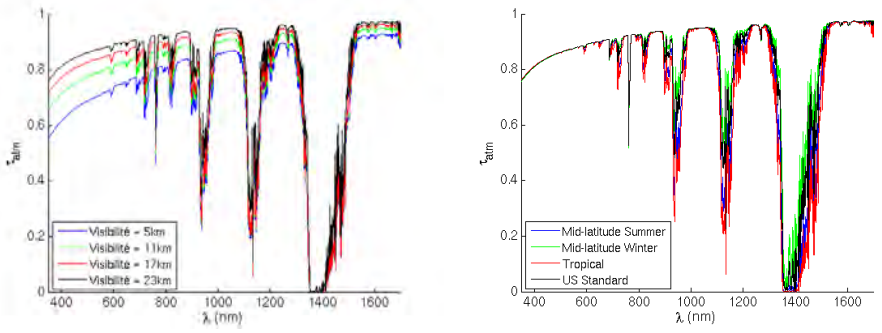
Par la suite, et étant donné une ligne de visée définie par sa longueur R, son point de départ M_0 et son point d'arrivée M_1, nous modéliserons l'impact de l'atmosphère sur la propagation de l'impulsion laser par une transmittance atmosphérique τ_{atm} telle que :

$$I(M_1) = \tau_{atm} I(M_0) \qquad [\text{W. sr}^{-1}] \tag{2.3.3}$$

En présence de l'atmosphère, l'équation 2.3.1 se réécrit donc :

$$E_i(R,t) = \frac{\tau_{atm}}{R^2} P_{i,total}\left(t - \frac{R}{c}\right) \qquad [\text{W. m}^{-2}] \tag{2.3.4}$$

La transmission atmosphérique τ_{atm} dépend de la longueur d'onde du laser, de la géométrie de la ligne de visée (sa longueur ainsi que son orientation) et des constituants de l'atmosphère.



(a) Effet de la visibilité. (b) Impact du modèle atmosphérique

Figure 2.4 – *Transmission atmosphérique spectrale simulée par Modtran (Berk et al. (1987)) pour une ligne de visée de* 1500*m au nadir. On montre l'effet de la visibilité (a) (modèle d'atmosphère « mid-latitude summer ») et du modèle d'atmosphère choisi (b) (visibilité* 23*km). Dans les deux cas on a choisi un modèle standard d'aérosols ruraux.*

Le modèle Modtran (*Berk* et al. *(1987)*) est un modèle de transfert radiatif permettant, entre autres, de calculer une transmission atmosphérique le long d'une ligne de visée en fonction des conditions atmosphériques. La figure 2.4 montre les résultats de simulation Modtran pour la transmittance atmosphérique le long d'une ligne de visée au nadir depuis une altitude de 1500m et jusqu'au niveau de la mer. On y constate le phénomène d'atténuation plus importante aux basses longueurs d'onde (diffusion moléculaire Rayleigh et diffusion due aux aérosols), ainsi que les bandes d'absorption liées en majorité à la vapeur d'eau. On a fait varier la visibilité (à gauche) et le modèle d'atmosphère (à droite). Les écarts observés lorsque la visibilité diminue sont dûs essentiellement à une diffusion plus importante par les aérosols. Les différences visibles lorsque le modèle d'atmosphère change sont en grande partie le fait de différences dans la concentration en vapeur d'eau présente dans l'atmosphère.

2.4 Interaction avec la scène

L'équation 2.3.4 exprime l'éclairement incident à une distance R dû à l'émission laser. Cet éclairement va interagir avec les surfaces distribuées dans la scène observée par le lidar. Dans le cas idéal où l'impulsion laser rencontre une unique surface plane, la rétro-diffusion de la lumière vers le capteur du lidar est aisément calculable. Mais, dans la plupart des cas, la distribution géométrique des objets offre une situation plus compliquée, et le laser éclaire plusieurs surfaces de dimensions et de nature variées, et distribuées à l'intérieur du faisceau.

2.4.1 Surfaces planes : BRDF / BTDF

La fonction de distribution de réflectance bi-directionnelle (BRDF, Bi-Directionnal Reflectance Distribution Function) (*Nicodemus* et al. *(1977)*) permet de décrire la réflexion de la lumière sur une surface matérielle tout en tenant compte des aspects directionnels de celle-ci. Elle est définie par *Nicodemus* et al. *(1977)* comme le rapport entre la luminance L_r réfléchie par la surface dans la direction $\vec{\omega_r}$ et l'éclairement E_i incident selon la direction $\vec{\omega_i}$:

$$BRDF(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r) = \frac{L_r(\vec{\omega}_r)}{E_i(\vec{\omega}_i)} \qquad [\mathrm{sr}^{-1}] \tag{2.4.1}$$

La BRDF n'est donc pas une grandeur adimensionnée, elle s'exprime en sr^{-1}.

De la même manière, on définit la fonction de distribution de la transmittance bi-directionnelle (BTDF, Bi-Directionnal Transmittance Distribution Function) comme le rapport entre la luminance transmise par la surface et l'éclairement incident :

$$BTDF(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r) = \frac{L_t(\vec{\omega}_r)}{E_i(\vec{\omega}_i)} \qquad [\mathrm{sr}^{-1}] \tag{2.4.2}$$

Dans le cas où une surface plane intercepte entièrement l'impulsion laser émise à une distance R du lidar, la luminance réfléchie vers le capteur s'exprime comme :

$$L_r(R, \vec{\omega}, t) = BRDF(\vec{\omega}, \vec{\omega}) E_i(R, \vec{\omega}, t) \vec{\omega} \cdot \vec{n} \qquad [\mathrm{W.\ m^{-2}.\ sr^{-1}}] \tag{2.4.3}$$

où $\vec{\omega}$ est la direction de visée du lidar et $\vec{n}$ le vecteur normal à la surface observée, les deux vecteurs étant supposés unitaires.

2.4.2 Expression générale de la luminance réfléchie

Dans le cas réel, et a fortiori en présence de végétation, les surfaces diffusantes interceptant l'impulsion laser émise seront distribuées de manière très variable à l'intérieur du cône d'émission du laser. Cette situation peut être ramenée à la situation précédente en traitant chaque surface illuminée indépendamment. Deux problèmes majeurs apparaissent alors :

- Certaines surfaces présentes dans le champ d'illumination du laser ne seront pas éclairées en raison d'autres objets les plongeant dans l'ombre. A moins d'une distribution bien particulière des surfaces diffusantes, il est très délicat, voire impossible, de traiter cet effet analytiquement.
- Il en va de même pour les diffusions multiples de la lumière dans la scène. Alors qu'une surface plane unique ne pouvait diffuser la lumière qu'une seule fois vers le capteur, une géométrie plus compliquée sera le siège de nombreuses diffusions dont le calcul analytique sera, une fois de plus, quasi-impossible.

Il est néanmoins possible de proposer une formulation pour la luminance réfléchie par une géométrie complexe en introduisant une nouvelle variable : la section efficace distribuée $\sigma(R)$ représentant la surface équivalente contribuant à réfléchir la lumière à la distance R du capteur (*Jelalian (1992); Wagner* et al. *(2006)*). On écrit alors la luminance réfléchie vers le capteur comme :

$$L_r(t) = \int_0^\infty \sigma(R) E_i \left(R, t - \frac{R}{c}\right) dR \qquad [\mathrm{W.\ m^{-2}.\ sr^{-1}}] \tag{2.4.4}$$

Ce que l'on écrira généralement comme le produit de convolution ($\star$) entre l'éclairement incident E_i lié au laser et une réponse impulsionnelle du lidar onde complète $\mathcal{I}$ dépendant uniquement de la géométrie et des propriétés optiques des objets observés, de sorte que l'équation 2.4.4 se réécrit :

$$L_r(t) = (\mathcal{I} \star P_{i,total})(t) \qquad [\mathrm{W.\ m^{-2}.\ sr^{-1}}] \tag{2.4.5}$$

où l'on a substitué la puissance émise à l'éclairement incident sur la cible grâce à l'équation 2.3.1.

L'estimation de la réponse impulsionnelle $\mathcal{I}$ est au cœur du problème de simulation de la mesure lidar onde complète et fera l'objet du chapitre 4. Elle doit prendre en compte non seulement la distribution des surfaces diffusantes à l'intérieur du faisceau laser, mais aussi la possible transmission de la lumière à travers certaines surfaces, ainsi que les diffusions multiples des photons sur plusieurs surfaces dans et en dehors du faisceau laser.

2.5 Collection, amplification et numérisation du signal

2.5.1 Collection de la luminance réfléchie

Une fois rétrodiffusée par la scène, la luminance L_r réfléchie vers le capteur parcourt le chemin inverse pour être collectée par le lidar. Le récepteur lidar est généralement caractérisé par un diamètre d'ouverture Φ définissant la surface de collection $S_c = \frac{\pi\Phi^2}{4}$, ainsi que d'un champ de vision Ω_c habituellement choisi de sorte que le champ de vision de l'instrument soit bien supérieur au champ d'illumination du laser.

Ceci étant défini, on exprime la puissance lumineuse collectée à l'instant t par le détecteur comme :

$$P_r(t) = L_r \left(t - \frac{R}{c}\right) S_c \Omega_c \qquad [\mathrm{W}] \tag{2.5.1}$$

Cette puissance collectée correspond uniquement à la partie du signal mesuré provenant de l'éclairement du laser. On lui ajoutera par la suite la contribution solaire, c'est à dire la luminance solaire $L_{r,\ soleil}$ réfléchie par la scène, de sorte que la puissance collectée devient :

$$P_r(t) = L_r \left(t - \frac{R}{c}\right) S_c \Omega_c + L_{r,\ soleil} S_c \Omega_c \qquad [\mathrm{W}] \tag{2.5.2}$$

On appelle ici $L_{r,\ soleil}$ la luminance solaire spectrale réfléchie par la scène et intégrée sur l'intervalle spectral de sensibilité du capteur.

2.5.2 Mesure et enregistrement du signal

La façon précise dont les systèmes lidar procèdent à la mesure et à l'enregistrement du signal lumineux collecté varie énormément selon le type d'instrument, les puissances engagées, et la longueur d'onde de l'émission laser. Il s'agit également là d'un domaine dans lequel les fabricants d'instruments communiquent très peu, même avec leurs clients, par souci sans doute de protéger la propriété industrielle des technologies développées. Pour ces raisons, nous pouvons seulement formuler quelques hypothèses et principes de fonctionnement, et imaginer plus tard un modèle pour notre simulateur.

D'une façon générale, la puissance collectée par le lidar est d'abord convertie en un signal électrique, par exemple au moyen d'une photodiode à avalanche. Il s'agit là du moyen le plus répandu dans les systèmes lidar à détection directe, bien que d'autres technologies puissent exister (photo-multiplicateurs, etc...).

Une photodiode à avalanche transforme la puissance lumineuse $P_r(t)$ reçue en un courant électrique selon l'équation :

$$i_0(t) = \eta\lambda\frac{q_e}{hc}G_{APD}P_r(t) \qquad [\mathrm{A}] \tag{2.5.3}$$

où η est l'efficacité quantique de la photodiode, q_e la charge de l'électron, et λ la longueur d'onde du rayonnement mesuré et G_{APD} le gain de la photodiode à avalanche. On trouve parfois cette équation sous la forme :

$$i_0(t) = R(\lambda)G_{APD}P_r(t) \qquad [\mathrm{A}] \tag{2.5.4}$$

$R(\lambda)$ est appelé « facteur de réponse spectrale en courant » ou encore « sensibilité » de la photodiode. Il se mesure en $A.W^{-1}$. La figure 2.5 montre la sensibilité spectrale de plusieurs types de photodiodes à avalanche couramment utilisées. Le gain G_{APD} de la photodiode dépend fortement du circuit dans lequel celle-ci est intégrée ainsi que de la tension qui est appliquée à ses bornes. La table 2.1 donne quelques exemples pour les valeurs de ce gain (*Iizuka (2008)*).

Table 2.1 – *Valeurs typiques du gain et du facteur d'excès de gain F_{ex} pour quelques exemples de photodiodes à avalanche (PerkinElmer).*

Type de photodiode	G_{APD}	F_{ex}	λ sensibilité
Silicium	150	4.9	de $300nm$ à $1100nm$
Germanium	10	9.2	de $800nm$ à $1600nm$
InGaAs	10	5.5	de $900nm$ à $1700nm$

La photodiode est à l'origine de deux bruits sur le signal. Le premier est un bruit additif dû au courant d'obscurité, au bruit thermique et au bruit dit « en 1/f ». Sa puissance équivalente (NEP_{APD}) est exprimée en A. $\mathrm{Hz}^{-\frac{1}{2}}$ de sorte que la variance de ce bruit Gaussien s'écrit :

$$\sigma^2_{NEP,APD} = NEP^2_{APD}B \qquad [\mathrm{A}^2] \tag{2.5.5}$$

où B est la bande passante du système. La seconde source de bruit est dépendante du signal incident ainsi que du facteur d'excès de bruit F_{ex} de la photodiode. On supposera qu'il s'agit également d'un bruit Gaussien.

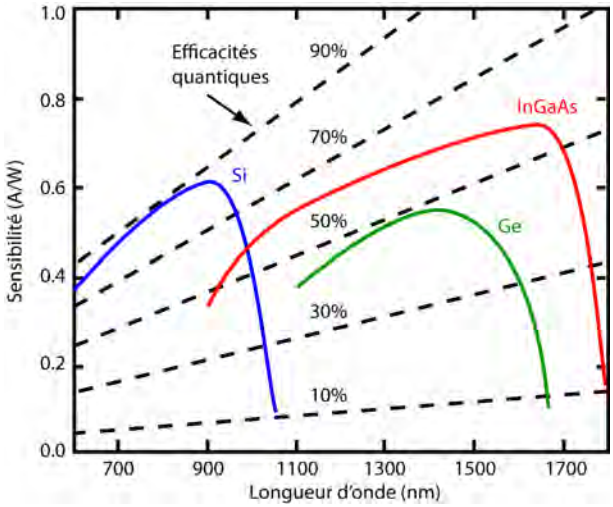


Figure 2.5 – *Sensibilité spectrale $R(\lambda)$ et efficacité quantique η de trois types de photodiodes à avalanche parmi les plus courants (PerkinElmer)*

La variance de ce bruit s'exprime donc :

$$\sigma^2_{Gain,APD}(t) = 2q_e G_{APD} F_{ex} B i_0(t) \qquad [\mathrm{A}^2] \tag{2.5.6}$$

Le facteur d'excès de gain F_{ex} est une propriété inhérente à la photodiode dont des valeurs typiques sont données dans la table 2.1.

Le signal électrique produit par le détecteur (généralement quelques nano-ampères) est ensuite amplifié électroniquement avant d'être numérisé, puis stocké. Un convertisseur analogique-numérique (CAN) permettant de numériser une tension d'entrée est décrit par 3 paramètres :

- La tension minimale U_{min} en deçà de laquelle le signal est considéré nul.
- La tension maximale U_{max}. Si cette tension est dépassée, le convertisseur est en saturation.
- Le nombre de bits n_{bits} sur lequel est codé le signal de sortie.

Il renvoie un signal de sortie S défini par :

$$S = \begin{cases} 0 \text{ si } U < U_{min} \\ 2^{n_{bits}-1} \text{ si } U > U_{max} \\ \left[\frac{U-U_{min}}{U_{max}-U_{min}}.2^{n_{bits}-1}\right] \text{ si } U_{min} \leq U \leq U_{max} \end{cases} \tag{2.5.7}$$

où [...] désigne la partie entière.

La quantification du signal entraine un bruit dont la variance vaut :

$$\sigma^2_{quant} = \frac{\delta U^2}{12} \tag{2.5.8}$$

où δU est le pas de la quantification :

$$\delta U = \frac{U_{max} - U_{min}}{2^{n_{bits}-1}} \tag{2.5.9}$$

Dans le chapitre 4, nous présenterons un modèle permettant d'approcher le comportement des systèmes commerciaux sur la base de plusieurs hypothèses de fonctionnement.

Chapitre 3

Modélisation du signal lidar : état de l'art

Sommaire

3.1 Introduction **37**
3.2 Simulation du lidar et végétation : différentes approches **37**
3.3 Modèles existants, points forts et points faibles **38**
3.3.1 Modèles analytiques 38
3.3.2 Végétation maillée 39
3.3.3 Végétation turbide : le modèle DART Lidar 43
3.4 Motivation du développement d'un nouveau modèle **44**
3.4.1 Contraintes 44
3.5 Conclusion : LuxRender et le Path-Tracing **45**

3.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons passé en revue les phénomènes physiques engagés dans la mesure lidar onde complète. Nous allons maintenant nous intéresser à la mise en œuvre de ces concepts dans un simulateur numérique de scanner laser onde complète aéroporté adapté à la végétation. Dans ce chapitre, nous commencerons par mettre en évidence les problèmes posés par la modélisation du lidar onde complète en présence de géométries complexes comme les feuillages. La simulation de l'observation d'un couvert végétal comporte en effet une difficulté majeure : la propagation d'une impulsion laser à l'intérieur d'un volume contenant un très grand nombre de surfaces diffusantes. Nous passerons en revue les différentes approches qui ont été envisagées pour la simulation de la mesure lidar onde complète en présence de végétation. Nous pourrons alors, au vu des points forts et des points faibles de chaque approche, expliquer notre motivation à développer un nouvel outil et justifier le choix d'une méthode de simulation bien précise.

3.2 Simulation du lidar et végétation : différentes approches

Lorsqu'il s'agit de modéliser un système d'observation, il apparait rapidement que la méthode utilisée est fortement contrainte par le type de scène dont on va simuler l'observation. Le problème de la modélisation de la mesure lidar sur une scène de végétation ne déroge pas à la règle. Bien décrire une scène de végétation est un exercice compliqué, tant du fait de la

difficulté à modéliser avec réalisme un couvert végétal, que par le volume très important de données géométriques nécessaires à une description précise.

Parmi les modèles de lidar onde complète développés par la communauté scientifique pour étudier l'observation de la végétation, plusieurs approches ont été recensées :

- En imagerie passive, on modélise souvent la végétation en lui attribuant des propriétés optiques (réflectance, transmittance) macroscopiques équivalentes et en la traitant comme une surface solide. Dans le cas du lidar, une telle approche est bien sûr impossible puisqu'elle ne prend absolument pas en compte les propriétés tri-dimensionnelles des couverts végétaux. Il est pourtant possible de l'adapter en utilisant des lois analytiques rendant compte de la distribution verticale du feuillage. On obtient alors un modèle analytique de lidar onde complète. A partir d'un modèle analytique décrivant la végétation à grande échelle, on dérive une forme d'onde lidar.

- Une deuxième approche consiste à assimiler la végétation à un milieu turbide, une sorte de gaz de feuilles. En effet, à grande échelle, un couvert végétal peut s'apparenter à un volume à l'intérieur duquel les surfaces diffusantes (les feuilles) sont réparties suivant une certaine distribution statistique. Une canopée est alors décrite par sa géométrie ainsi que par une série de paramètres statistiques rendant compte de la répartition du feuillage à l'intérieur du volume. L'impulsion laser est propagée dans le milieu turbide grâce au calcul statistique de son interception et de sa diffusion dans toutes les directions de l'espace.

- Enfin, il est possible de tenter la description de la végétation par une géométrie maillée. Chaque feuille et chaque branche de chaque arbre étant décrite par une ou plusieurs facettes triangulaires possédant ses propres propriétés optiques. Cette description de la végétation rend plus aisée la simulation de la propagation de la lumière. Cependant, la difficulté principale résidera dans la génération de modèles de végétation réalistes ainsi que dans la gestion de géométrie comportant un très grand nombre de facettes.

3.3 Modèles existants, points forts et points faibles

3.3.1 Modèles analytiques

Ni-Meister et al. *(2001)* et *Sun et Ranson (2000)* présentent des approches analytiques pour la simulation de signaux lidar onde complète sur des canopées hétérogènes. Le signal lidar onde complète est estimé à partir d'une description géométrique simple des couronnes des arbres, et de fonctions décrivant la végétation telles que la distribution verticale de la densité de feuillage, la distribution de la densité de trous, etc...

Au cours de notre travail, nous avons été amenés à utiliser une approche similaire. C'est en effet le calcul analytique de la réponse lidar onde complète d'une couche homogène de végétation qui nous permettra de valider en partie notre futur modèle (voir section 6.3). Le calcul développé dans le chapitre 6 nous permet de calculer un signal lidar onde complète à partir de paramètres décrivant la végétation tels que la réflectance des feuilles, l'épaisseur et la densité de la couche de végétation, et la loi d'orientation des feuilles.

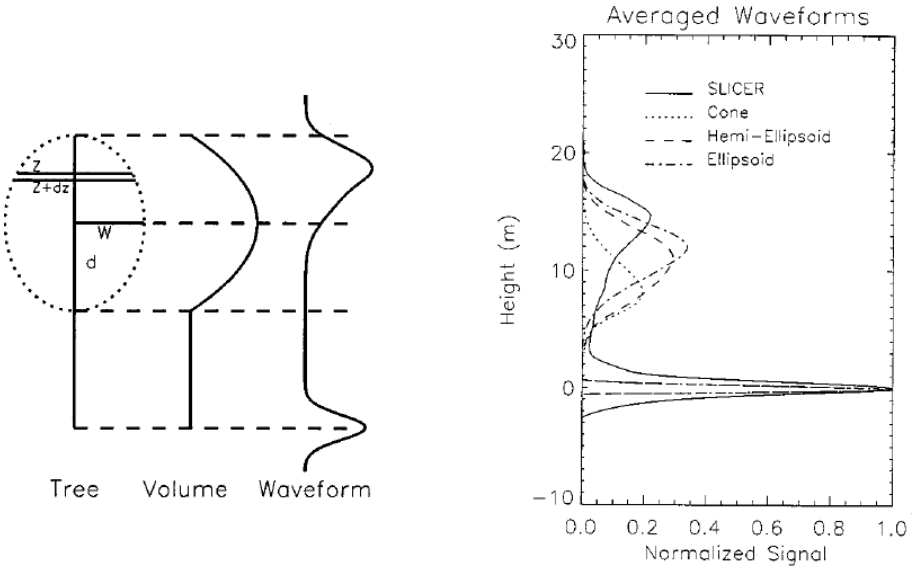


Figure 3.1 – *Illustrations tirées de Sun et Ranson (2000). A gauche, principe de paramétrisation d'un arbre constitué d'une couronne ellipsoïdale homogène et signal simulé. A droite, comparaison des signaux simulés en supposant différentes formes de couronnes pour les arbres. Les signaux représentés sont les signaux moyens sur toute une zone de forêt et sont comparés aux signaux moyens issus de l'instrument SLICER.*

Ni-Meister et al. *(2001)* et *Sun et Ranson (2000)* montrent que les résultats obtenus sont comparables à des signaux réels comme ceux mesurés par l'instrument *SLICER* (figure 3.1). Néanmoins, ce type de modèle nécessite une bonne connaissance de la scène observée, et surtout la capacité de modéliser la distribution de la végétation au moyen de fonctions simples. Ainsi, la majorité de l'erreur commise par les modèles analytiques est imputable à une mauvaise description des feuillages, ou à une forme trop simpliste des couronnes des arbres. De plus, les modèles analytiques se contentent d'évaluer les rétrodiffusions directes et sont incapables de prendre en compte les diffusions multiples de la lumière dans les feuillages.

3.3.2 Végétation maillée

Une autre approche consiste à décrire la végétation par des surfaces maillées. De cette façon, il est possible de prendre en compte les hétérogénéités des feuillages, ainsi que de modéliser des scènes qu'il ne serait pas possible de décrire par une série de paramètres globaux. La propagation de l'impulsion laser est alors simulée par un algorithme Monte-Carlo de lancer de rayon ou de photons.

Une telle approche est utilisée par *Morsdorf* et al. *(2007)* pour simuler l'observation d'une scène de végétation par un scanner laser aéroporté à petite empreinte. Le modèle utilise le lancer de rayons open-source POV Ray [1]. La figure 3.2 illustre le principe de simulation adopté par *Morsdorf* et al. *(2007)* ainsi que quelques résultats de simulation.

Sur la base de cette publication, nous avons développé un premier modèle de lidar onde complète qui a servi à appréhender le problème de la modélisation et à mettre en avant les points sur lesquels il faudra insister par la suite.

1. Persistence Of Vision Ray-tracer - http ://www.povray.org/

Principes de modélisation

La méthode la plus simple de rendu d'image par lancer de rayon consiste à calculer les couleurs des pixels de l'image en lançant pour chaque pixel un rayon à partir d'une « caméra ». Vient ensuite un test d'intersection avec les objets de la scène modélisée. Si aucun objet n'est touché, la couleur du pixel concerné est celle définie comme couleur de fond par l'utilisateur (le plus souvent le noir). Si un objet est touché, on procède au lancer de nouveaux rayons, dits « rayons d'ombrage », à partir du point d'intersection vers les sources de lumière de la scène. Ces rayons permettent de déterminer si le point d'intersection est éclairé par une ou plusieurs sources, et en fonction des couleurs de ces sources, de calculer la couleur du pixel.

Pour modéliser un lidar, on configure la scène de façon à ce que la caméra et la source de lumière soient placées à la même position, leurs champs de vision et d'illumination étant confondus. Ceci étant fait, on réalise un rendu d'image. On associe la couleur des pixels de l'image aux puissances lumineuses mesurées par le capteur.

Le logiciel POV-Ray permet de plus, de façon très simple, de calculer les distances parcourues par chaque rayon lancé (un rayon par pixel de l'image) avant intersection d'un objet de la scène. Grâce à cette information de distance parcourue, on est capable de recomposer une réponse impulsionnelle de lidar à onde complète (voir section 2.4.2). On calcule ensuite la réponse temporelle par convolution de la réponse impulsionnelle avec l'impulsion réelle envoyée par le lidar (équation 2.4.5). C'est ce procédé qui est schématisé sur la figure 3.3

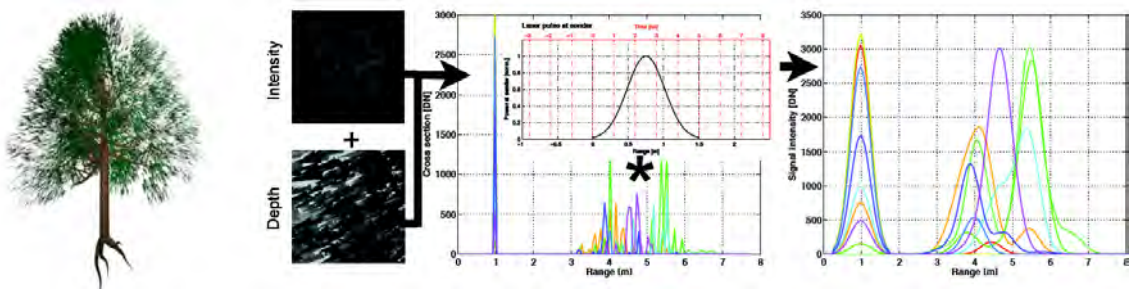


Figure 3.2 – *Illustrations tirées de Morsdorf* et al. *(2007). De gauche à droite, rendu d'un modèle d'arbre utilisé avec le modèle basé sur POV-Ray, principe de simulation du signal lidar, exemples de signaux simulés.*

Exemples d'exploitation du modèle

Au démarrage de nos travaux, nous avons implémenté une version de ce modèle de lidar onde complète basé sur POV-Ray. Ceci nous a permis de simuler un scanner laser aéroporté sur des scènes de végétation simples et de juger des performances de cette approche. Quelques exemples de simulations sont présentés par la suite.

Ces résultats sont présentés ici en tant que simples illustrations du travail réalisé avec le modèle. Nous ne nous étendrons pas en explications sur les principes de réalisation des figures présentées. Nous reviendrons sur les points importants par la suite.

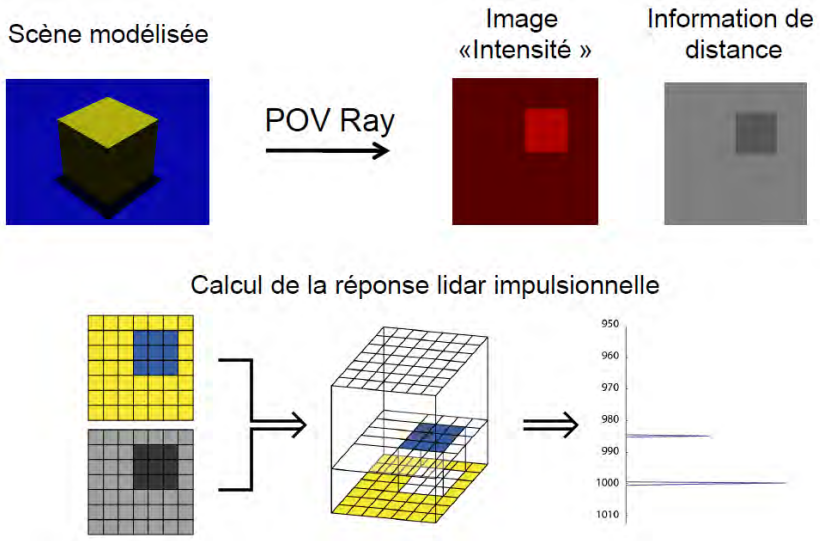


Figure 3.3 – *Principe de base de la modélisation du lidar à onde complète avec un lancer de rayon tel que POV-Ray. Illustration sur une scène simple : le lancer de rayon fournit deux images indiquant la puissance reçue, et les distances parcourues, on combine ensuite les informations pour reconstituer une réponse impulsionnelle.*

La figure 3.4 montre un exemple de signal lidar simulé avec le modèle basé sur POV-Ray. Le signal a été généré sur un modèle sommaire d'arbre du type de ceux montrés sur la figure 3.5. Ce premier essai de modélisation permet de visualiser un premier signal, et d'observer deux grandes parties : une première succession d'échos rapprochés parvenant du feuillage de l'arbre, et un écho plus ou moins atténué revenant du sol.

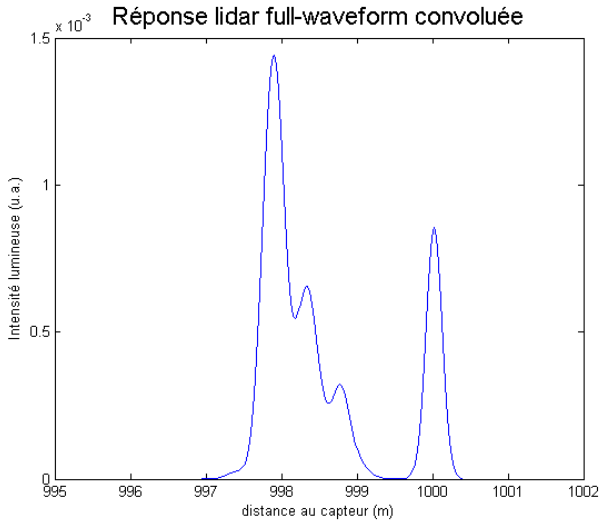


Figure 3.4 – *Premier essai de modélisation avec le lancer de rayon POV-Ray. On observe un écho de végétation composé de plusieurs pics intermédiaires (à gauche) ainsi qu'un écho de sol (à droite).*

Une version du modèle permettant de séquencer les simulations à la manière d'un scanner laser aéroporté nous permet de simuler le balayage d'une scène comprenant quelques arbres ainsi qu'un objet caché. Grâce au logiciel Avizo (VSG), nous avons alors pu réaliser une reconstruction 3D de la scène observée. Ces résultats sont résumés sur la figure 3.5.

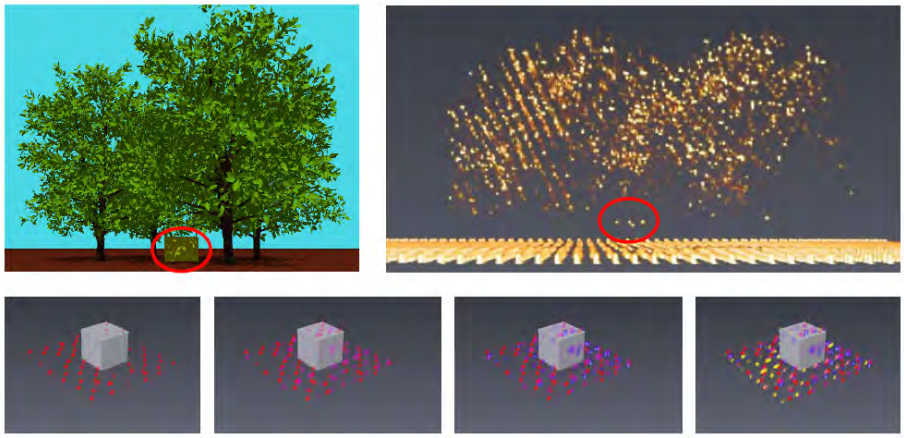


Figure 3.5 – *Premier essai de reconstruction de scène grâce aux signaux simulés. Scène modélisée (en haut, à gauche), visualisation d'un jeu de données simulées (en haut, à droite) et première illustration de l'apport de la combinaison de différents points de vue pour la reconstruction du cube situé sous les arbres (en bas).*

Limitations physiques de la méthode

La première grande limitation du modèle basé sur POV Ray est d'ordre physique : il est en effet impossible de simuler les diffusions multiples des photons sur les surfaces de la scène, à moins de procéder à de grandes modifications du moteur de lancer de rayon. D'autre part, POV Ray a été développé pour la synthèse d'images numériques. Cela signifie que de nombreuses approximations et hypothèses non physiques sont réalisées afin d'accélérer le processus ou d'améliorer la qualité visuelle des résultats produits, ceci au détriment de la précision physique. Par exemple, les propriétés optiques des objets ne sont décrites que par une couleur dans le système RGB 8 bits, c'est à dire par trois entiers compris entre 0 et 255.

Autres modèles

D'autres modèles basés sur le lancer de rayons ont été développés, comme par exemple le modèle Lidar inclus dans DIRSIG (Digital Imaging and Remote Sensing Image Generation Model) (*Burton* et al. *(2002)*) ou le modèle FLIGHT (*North* et al. *(2010)*), qui sont capables de manipuler des grandeurs physiques et de prendre en compte les diffusions multiples de la lumière dans la scène. N'ayant pas accès à ces modèles, nous n'avons pas pu les tester.

3.3.3 Végétation turbide : le modèle DART Lidar

Une solution intermédiaire consiste à traiter la végétation comme un « milieu turbide » emplissant un certain volume de l'espace. A l'intérieur de ce volume, la propagation de la lumière est simulée de manière statistique en fonction de paramètres représentatifs de la végétation, comme la densité volumique de feuilles, la surface des feuilles, leur réflectance, etc... Modéliser les couverts végétaux de cette manière permet de diminuer considérablement le nombre de facettes triangulaires dans la scène, et donc de faciliter des approches du type « lancer de rayons » ou « lancer de photons ». Le meilleur exemple de modèle de transfert radiatif utilisant une description turbide de la végétation est le modèle DART (Discrete Anisotropic Radiative Transfer) (*Gastellu-Etchegorry* et al. *(1996); Yin* et al. *(2013)*) qui procède par un lancer de photons Monte-Carlo dans une géométrie composée de maillages (troncs, sol, batiments, etc...) et de végétation turbide.

Le principe de simulation du lidar onde complète dans DART est relativement simple : des photons sont envoyés dans la scène modélisée à partir du lidar, ces photons sont ensuite suivis dans leurs interactions avec les objets de la scène jusqu'à ce qu'ils reviennent vers le capteur ou qu'ils sortent de la scène modélisée. Les interactions entre un photon et les surfaces prennent la forme de tirages aléatoires permettant, en fonction des propriétés de la surface concernée, de déterminer si le photon doit être absorbé, transmis ou réfléchi, et le cas échéant de choisir la direction de réflexion ou de transmission. Chaque photon transporte un quantum d'énergie constant, et c'est le comptage des photons revenus au détecteur, ainsi que la mémorisation de la longueur du chemin qu'ils ont parcouru qui permet de simuler un signal de type « onde complète ».

L'inconvénient majeur de cette méthode pour la simulation du lidar onde complète est le nombre important de photons nécessaire à l'obtention d'un signal réaliste. Un très grand nombre des photons lancé est en effet perdu au sens où ils ne reviennent pas vers le capteur. Il est bien entendu utile de connaître la part de photons perdus afin de quantifier le signal reçu, mais ceci peut être obtenu par des méthodes plus économes en temps de calcul.

C'est afin d'accélérer les calculs sur les scènes de végétation que l'approche de modélisation par un milieu turbide a été mise en place en premier lieu. Il est en effet plus économe en temps de calcul de simuler la propagation d'un photon à l'intérieur d'une cellule turbide plutôt qu'à l'intérieur d'un nuage de facettes triangulaires. Cependant, la modélisation de la végétation comme un milieu turbide possède un autre inconvénient majeur dans le cadre de notre étude. Pour la simulation réaliste d'une mesure lidar onde complète, il parait important que le modèle de végétation puisse rendre compte de manière réaliste des hétérogénéités de la végétation à une échelle inférieure à la dimension de l'empreinte laser. Dans notre cas, la petite dimension de la tâche laser au sol (environ 0.5m) nous contraint à l'utilisation de petites cellules turbides pour modéliser un couvert végétal hétérogène. Plus les cellules sont petites, plus elles seront nombreuses, et l'avantage de la modélisation turbide de la végétation sera alors moins important. Cette approche est en fait surtout performante pour la simulation de mesures à plus grande empreinte, issue de lidars satellitaires par exemple.

3.4 Motivation du développement d'un nouveau modèle

3.4.1 Contraintes

Précision physique du transfert radiatif

Avec en vue l'objectif de dimensionnement de futurs instrument aéroportés, il apparait essentiel de disposer d'un modèle de lidar possédant une assise physique solide. Une solution de transfert radiatif manipulant de réelles grandeurs physiques devra donc être privilégiée, de même que la possibilité de prendre en compte les diffusions multiples de la lumière dans une géométrie complexe.

On s'attachera également à pouvoir assortir le modèle de lidar d'une simulation de la transmission atmosphérique le long de la ligne de visée. La possibilité de prendre en compte la contribution liée à l'éclairement de la scène par le soleil et par le ciel sera aussi un atout non négligeable.

Cette contrainte exclut l'utilisation de modèles de lancer de rayon simplifiés tels que POV-Ray, puisqu'ils possèdent l'inconvénient de manipuler des grandeurs non physiques. Le modèle de lancer de photons Monte-Carlo DART Lidar possède, par contre, le grand avantage d'être fondé sur de solides bases physiques et pourrait s'avérer une solution intéressante.

Précision de la modélisation de la végétation

Notre étude se situe dans le cas de l'observation des couverts végétaux à haute résolution, et il parait donc crucial d'être capable de prendre en compte un modèle de végétation réaliste à une échelle inférieure à la dimension typique de l'empreinte laser au sol (de l'ordre de $0.5m$). A ce jour, seule la description de la végétation par des maillages 3D semble permettre de modéliser les hétérogénéités d'un couvert végétal à une telle échelle de façon réaliste. Il faudra donc s'orienter vers un moteur de transfert radiatif permettant de prendre en compte de tels modèles comportant un très grand nombre de facettes.

Temps de calcul

Un autre critère important dans le choix d'un outil de simulation est le temps de calcul. Nous nous sommes en effet fixé pour objectif de travailler sur l'observation de scènes de végétation par un scanner laser aéroporté. Ce type d'instrument est capable de balayer la scène observée à très haute fréquence de sorte à produire plusieurs signaux lidar onde complète par mètre carré. Dès lors, si l'on simule l'observation d'une parcelle carrée de forêt de 100m de coté, un scanner produisant 3 signaux lidar par mètre carré donnera environ 30000 signaux au total. Si l'on souhaite in fine combiner des observations sous trois points de vue différents, il nous faudra procéder à la simulation de 90000 mesures lidar onde complète. Ce très grand nombre de mesures individuelles à simuler contraint fortement le temps de calcul nécessaire à la réalisation d'une simulation, puisque dès lors qu'un signal est simulé en 30 secondes, la simulation de la totalité des trois jeux de données demandera 45000 minutes ou encore 31 jours et 6 heures de simulation.

Même si l'on peut imaginer se concentrer sur des scènes moins étendues, il apparait donc crucial de pouvoir simuler une mesure lidar onde complète en un temps bien inférieur à 30 secondes sur une scène de végétation complexe. Cette contrainte est en fait de loin la plus importante. Très peu de modèles physiques sont capables de traiter des géométries comportant plusieurs centaines de milliers de triangles dans les délais énoncés plus haut. Lors de nos premiers test, nous avons utilisé le modèle DART Lidar pour simuler l'observation d'une scène de quelques mètres carrés comportant une simple couche de végétation homogène

ainsi qu'un sol plan. Le temps nécessaire à cette simulation était d'environ 45 secondes, ce qui nous a conduit à penser que les temps de calculs nécessaires à la prise en compte d'une scène bien plus complexe seraient rédhibitoires. Notre test de DART a été réalisé en novembre et décembre 2010. Dans sa version 2013, le modèle DART Lidar a été largement remanié et ses performances en termes de temps de calcul ont été améliorées, notamment grâce à une parallélisation des calculs et au développement d'une méthode combinant lancer de photon Monte-Carlo et lancer de rayon pour l'optimisation des temps de calculs lors des simulations lidar.

Il est à noter que nous n'avons pas envisagé ici la possibilité de recourir au calcul massivement parallèle. Dans un futur proche, l'avènement de la technologie GPU (Graphics Processing Unit) devrait permettre d'accélérer très efficacement les algorithmes Monte-Carlo, qu'il s'agisse du lancer de rayon ou du suivi de photon.

3.5 Conclusion : LuxRender et le Path-Tracing

Au cours d'une visite scientifique réalisée à l'IGN (MATIS) courant 2011, j'ai découvert le moteur de lancer de rayon LuxRender [2]. Ce lancer de rayon possède la particularité intéressante d'être basé sur les lois de la physique tout en proposant une implémentation algorithmique très efficace basée sur le programme de lancer de rayon pédagogique PBRT [3](*Pharr et Humphrey (2004)*). *Coubard* et al. *(2011)* utilisent par exemple LuxRender pour réaliser une inversion d'images issues de capteurs passifs. Assez rapidement, il est apparu que LuxRender pourrait également permettre de simuler la mesure lidar onde complète tout en répondant à chacun de nos besoins.

Les tests préliminaires réalisés ont également démontré la capacité de LuxRender de prendre en compte des géométries maillées comportant plusieurs centaines de milliers de facettes dans des temps de calculs correspondant à nos attentes. Nous avons donc décidé de nous lancer dans le développement d'un tout nouvel outil de simulation du lidar onde complète autour de LuxRender.

Le développement d'un nouveau modèle nous a permis d'orienter parfaitement les capacités de l'outil à notre problématique. Il a également permis de s'approprier toutes les notions importantes ainsi que de bien comprendre les phénomènes physiques mis en jeux lors des différentes étapes de la mesure. Les problèmes inhérents au développement du modèle ont conduit à de nombreuses idées dont nous avons tiré parti par la suite. Le chapitre 4 reprend en détail les principes de fonctionnement de ce nouveau modèle.

2. http ://www.luxrender.net/
3. Physically Based Ray Tracing, http ://www.pbrt.org/

Chapitre 4

Le simulateur numérique DELiS

Sommaire

4.1 Introduction, principe général 47
4.2 Le Path-Tracing pour la simulation du lidar onde complète . . . 48
4.2.1 Principes généraux de simulation 49
4.2.2 Détails des calculs 52
4.2.3 Calcul de la réponse impulsionnelle 53
4.2.4 Bilan, sources d'erreurs 54
4.3 Modèles de soleil et d'atmosphère 55
4.3.1 Simulation de la composante solaire 55
4.3.2 Prise en compte de l'extinction atmosphérique 60
4.3.3 Conclusion 60
4.4 Modèle d'instrument pour DELiS 61
4.4.1 Synthèse de la luminance reçue par le lidar 61
4.4.2 Mesure et amplification du signal 61
4.4.3 Bilan global et ordres de grandeurs 63
4.5 Conclusion 65

4.1 Introduction, principe général

Le modèle DELiS (n-Dimensionnal Estimation of Lidar Signals) (*Ristorcelli* et al. *(2012)*) a été développé autour du moteur de lancer de rayon LuxRender en tirant parti de son algorithme de rendu d'image par « path-tracing ». Ce module central appelé par le modèle permet d'estimer la réponse impulsionnelle $\mathcal{I}$ (voir section 2.4.2) en fonction de la géométrie et des propriétés optiques des objets observés.

Nous avons construit le reste du modèle autour de ce cœur, lui ajoutant les éléments suivants :

- Un module capable de paramétrer un rendu LuxRender à partir de la configuration du système lidar simulé ;
- Un traitement des données de sortie du path-tracing permettant de générer le signal lidar optique idéal reçu par l'instrument ;
- Un couplage avec le modèle de transfert radiatif Modtran (*Berk* et al. *(1987)*) permettant de prendre en compte la transmission atmosphérique le long de la ligne de visée ;

- Un second couplage avec Modtran permettant d'estimer les contributions au signal lidar liées aux éclairements provenant du soleil et du ciel ;
- Un module « instrument » simulant la détection du signal optique par une photodiode à avalanche, l'amplification du signal et sa numérisation et tenant compte des différents bruits intervenant sur la chaîne de mesure.

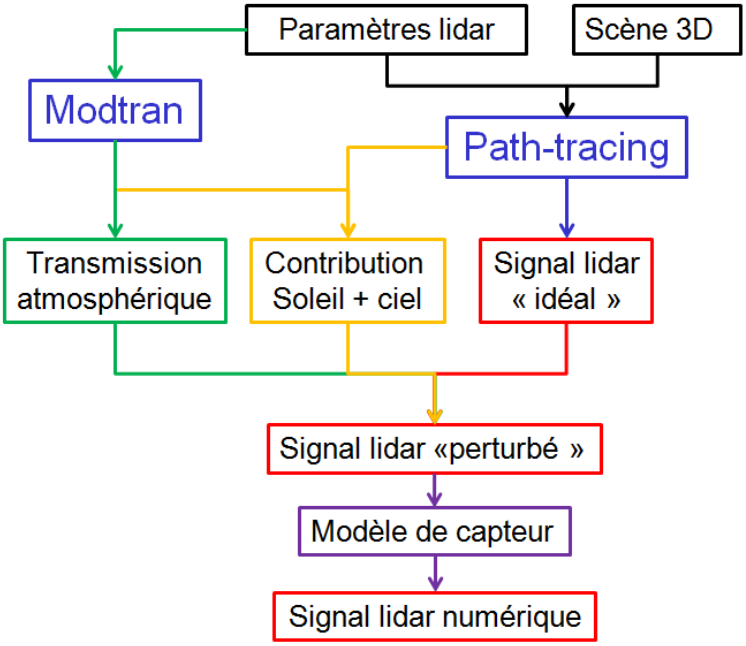


Figure 4.1 – *Principe de fonctionnement du modèle DELiS. L'algorithme de path-tracing de LuxRender est entouré d'un module préparant les données d'entrée du path-tracing, d'un module « atmosphère + soleil » utilisant le modèle Modtran, et d'un module « instrument ».*

Le schéma de la figure 4.1 résume l'architecture du modèle DELiS. Dans ce chapitre, nous détaillons le fonctionnement individuel de chacun des modules.

4.2 Le Path-Tracing pour la simulation du lidar onde complète

Equation de rendu

L'équation radiométrique locale, ou équation de rendu en un point M est une simple expression de la conservation de l'énergie (*Pharr et Humphrey (2004)*) :

$$L(M,\vec{\omega}) = L_{emise}(M,\vec{\omega}) + \int_{\vec{\omega}_i \in Sphere} f(M,\vec{\omega},\vec{\omega}_i).L_{incidente}(M,\vec{\omega}_i) \qquad [\mathrm{W.\ m^{-2}.\ sr^{-1}}] \tag{4.2.1}$$

Elle exprime que la luminance venant du point M dans la direction $\vec{\omega}$ est la somme de la luminance émise par M dans cette direction et de la luminance provenant de l'environnement et réfléchie ou transmise par le point M.

Réaliser un rendu d'image à partir d'une scène synthétique revient à calculer les luminances émises dans la direction de la caméra par les points visibles de la scène. Pour cela il faut procéder de manière récursive, la luminance $L_{incidente}(M, \vec{\omega}_i)$ incidente en chaque point M étant elle-même exprimable comme la somme d'une luminance émise et de luminances diffusées.

Une des méthodes de résolution approchée de l'équation de rendu est le lancer de rayon. Cette méthode utilise la propriété de conservation de la luminance lors d'un trajet dans le vide pour calculer les luminances se propageant le long de rayons lancés à partir des sources de lumière ou à partir de la caméra, et propagés à travers la scène suivant différentes méthodes. Couplées à une méthode d'estimation Monte-Carlo, les techniques de lancer de rayon permettent d'obtenir des résultats très satisfaisants en termes d'images simulées, mais aussi de simuler de nombreux phénomènes physiques liés à la propagation de la lumière.

Hypothèses de modélisation

Dans toute la suite de cette section, nous considérerons que :
- La scène simulée est constituée uniquement de surfaces opaques ou semi-transparentes dont les propriétés optiques sont décrites par une BRDF et/ou une BTDF. En particulier, les objets de la scène n'émettent pas de lumière.
- La lumière se propage dans l'espace séparant les surfaces de la scène comme dans du vide, c'est à dire avec une célérité $c = 3.10^8 \mathrm{ms}^{-1}$.
- Le lidar est composé d'une source de lumière S conique monochromatique représentant le laser et d'un détecteur mesurant l'intensité lumineuse reçue. On considère également que la source et le détecteur sont colocalisés en un point P_0 de l'espace, de même orientation $\vec{\Omega}_0$ et de même champ de vision.

4.2.1 Principes généraux de simulation

Un modèle simple de lidar à onde complète est constitué de deux éléments : une source de lumière directive et pulsée, le laser, et un capteur capable de mesurer une intensité lumineuse et son évolution temporelle. Simuler le signal observé par un instrument de ce type sur une scène prédéfinie revient uniquement à mesurer l'intensité lumineuse reçue par le capteur au cours du temps. Pour cela, l'algorithme de path tracing procède tout d'abord à un échantillonnage à partir du capteur P_0 des directions situées dans son champ de vision. C'est en effet uniquement de ces directions que le senseur est susceptible de recevoir de la lumière. Le reste de l'algorithme consiste en une estimation de la luminance parvenant au capteur dans la direction $\vec{\omega}_0$ choisie.

La première opération à réaliser est un calcul d'intersection de la droite $(P_0, \vec{\omega}_0)$ avec les objets de la scène. Si aucun objet n'est situé dans cette direction, aucune intensité lumineuse n'est observée, et l'on peut choisir une nouvelle direction $\vec{\omega}_0$. Si, par contre, une surface est touchée en un point P_1, on cherche à calculer la luminance diffusée par cette surface dans la direction $-\vec{\omega}_0$. Cette luminance se calcule comme la somme de la luminance reçue de la part de la source et diffusée en P_1 vers le capteur et de l'intégrale sur l'espace des directions des luminances venant du reste de l'environnement et diffusées par P_1 vers le capteur situé en P_0 :

$$L(P_0, \vec{\omega}_0) = L(S \to P_1 \to P_0) + \int_\Omega f(P_1, \vec{\omega}_0, \vec{\omega}) L(P_1, \vec{\omega}) d\vec{\omega} \qquad [\mathrm{W.\ m^{-2}.\ sr^{-1}}] \qquad (4.2.2)$$

$f(P_1, \vec{\omega}_0, \vec{\omega})$ étant le facteur rendant compte de la diffusion en P_1 de la luminance $L(P_1, \vec{\omega})$ provenant de la direction $\vec{\omega}$ vers la direction $\vec{\omega}_0$.

Toute la difficulté de la simulation réside dans le calcul de l'intégrale. On pourrait choisir de sonder chaque direction individuellement et de procéder au même calcul, mais l'on serait de nouveau confronté à de nombreux calculs de la même intégrale, et le temps de calcul nécessaire serait bien trop important.

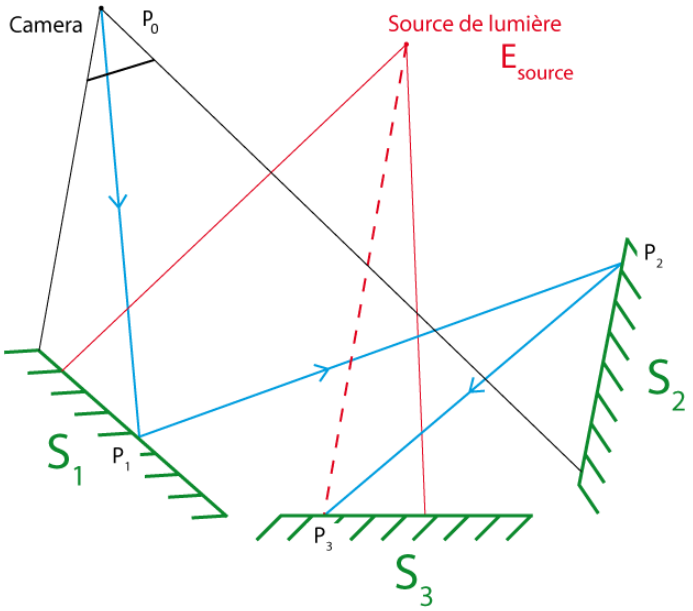


Figure 4.2 – *Schéma de principe du path-tracing : exemple de chemin.*

La technique de path-tracing consiste à résoudre ce problème de manière approchée par une méthode Monte Carlo. Au lieu d'essayer d'estimer la valeur de l'intégrale, on va choisir par tirage aléatoire une direction $\vec{\omega}_1$ dans laquelle on ira sonder l'environnement autour de P_1. La répétition d'un très grand nombre de tirages pour $\vec{\omega}_0$ et pour $\vec{\omega}_1$ assurera la convergence vers la valeur exacte de l'intégrale. Afin d'optimiser le temps de calcul, la densité de probabilité utilisée lors du tirage de la direction $\vec{\omega}_1$ pourra ne pas être uniforme. Si cette densité de probabilité est notée $p(\vec{\omega_1})$, on a alors, en répétant le tirage de la direction $\vec{\omega}_1$, une estimation de la luminance $L(P_0, \vec{\omega}_0)$ avec n rayons lancés :

$$L(P_0, \vec{\omega}_0) = L(S \to P_1 \to P_0) + \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} f(P_1, \vec{\omega}_0, \vec{\omega}_k) \frac{L(P_1, \vec{\omega}_k)}{p(\vec{\omega_k})} \tag{4.2.3}$$

Seulement, afin de calculer les luminances $L(P_1, \vec{\omega_k})$, il nous faut utiliser le même principe, et ainsi de suite. Pour cette raison, l'algorithme de path-tracing choisit aléatoirement une direction unique $\vec{\omega_1}$ à partir de laquelle on va continuer les calculs. En procédant ainsi à chaque surface interceptée, on génère aléatoirement et par étapes un chemin possiblement suivi par la lumière dans la scène. On calcule une luminance :

$$\begin{aligned} L_{Chemin}(P_0) &= L(S \to P_1 \to P_0) + L(P_2 \to P_1 \to P_0) \\ &= L(S \to P_1 \to P_0) + L(S \to P_2 \to P_1 \to P_0) + L(P_3 \to P_2 \to P_1 \to P_0) \\ &= \ldots \end{aligned} \tag{4.2.4}$$

Le chemin s'arrête lorsqu'une direction choisie n'intercepte aucun objet de la scène, ou lorsque le nombre d'itérations atteint une limite fixée par l'utilisateur.

Afin d'ajouter la dimension temporelle inhérente au lidar onde complète, il suffit de calculer les distances parcourues par la lumière le long du chemin, et l'on obtient pour un chemin :

$$\begin{aligned} L_{Chemin}(P_0,t) &= L(S \to P_1 \to P_0).\delta\left(t - \tfrac{d_1}{c}\right) + L(P_2 \to P_1 \to P_0, t) \\ &= L(S \to P_1 \to P_0).\delta\left(t - \tfrac{d_1}{c}\right) \\ &+ L(S \to P_2 \to P_1 \to P_0).\delta\left(t - \tfrac{d_2}{c}\right) \\ &+ L(P_3 \to P_2 \to P_1 \to P_0) \\ &= ... \end{aligned} \tag{4.2.5}$$

où d_N est la longueur du chemin $(P_0, ..., P_N, S)$:

$$d_N = d(S, P_N, ..., P_k, ..., P_0) = ||\overrightarrow{SP_N}|| + \sum_{k=0}^{N-1} ||\overrightarrow{P_kP_{k+1}}|| \qquad [\mathrm{m}] \tag{4.2.6}$$

Il est donc nécessaire de calculer deux grandeurs en chaque point P_k du chemin :

- La luminance $L(S \to P_k \to P_{k-1}) = L_{s,k,k-1}$ reçue par P_k de la part de la source, et diffusée vers le point P_{k-1} ;
- Le facteur multiplicatif f_k qu'il faudra appliquer pour diffuser la luminance venant du point P_{k+1} et réfléchie en P_k vers le point P_{k-1} selon la relation

$$L(P_{k+1} \to P_k \to P_{k-1}) = f_k.L(P_{k+1} \to P_k) \qquad [\mathrm{W.\ m^{-2}.\ sr^{-1}}] \tag{4.2.7}$$

  Ce facteur dépend de la BRDF de la surface au point P_k ainsi que des directions incidentes $\vec{\omega}_{k,k+1} = \overrightarrow{P_kP_{k+1}}$ et de sortie $\vec{\omega}_{k,k-1} = \overrightarrow{P_kP_{k-1}}$ et prend en compte la densité de probabilité de la direction de sortie $\vec{\omega}_{k,k+1}$.

Avec ces notations, la valeur estimée de la luminance le long du chemin $(P_0, ..., P_k, ..., P_N)$ s'écrit :

$$L_{Chemin}(P_0, \vec{\omega_0}) = L_{s,1,0} + f_1(L_{s,2,1} + f_2(L_{s,3,2} + ...)) \qquad [\mathrm{W.\ m^{-2}.\ sr^{-1}}] \tag{4.2.8}$$

où l'on a omis l'aspect temporel afin de simplifier l'écriture. En développant l'expression précédente, on obtient :

$$L_{Chemin}(P_0, \vec{\omega_0}) = L_{s,1,0} + \sum_{k=2}^{N} \left[\left(\prod_{i=1}^{k-1} f_i \right) L_{s,k,k-1} \right] \qquad [\mathrm{W.\ m^{-2}.\ sr^{-1}}] \tag{4.2.9}$$

et en tenant compte de l'aspect temporel :

$$L_{Chemin}(P_0, \vec{\omega_0}) = L_{s,1,0}\delta\left(t - \frac{d_1}{c}\right) + \sum_{k=2}^{N} \left[\left(\prod_{i=1}^{k-1} f_i \right) L_{s,k,k-1}\delta\left(t - \frac{d_k}{c}\right) \right] \qquad [\mathrm{W.\ m^{-2}.\ sr^{-1}}] \tag{4.2.10}$$

Le path tracing consiste en fait à calculer la contribution d'un parcours possible de la lumière dans la scène et à approcher la valeur exacte de la luminance finale mesurée en multipliant les générations aléatoires de chemins. On échantillonne ainsi l'espace immense des chemins possibles.

Cet algorithme présente l'avantage d'etre **non biaisé** (*Pharr et Humphrey (2004)*). Cela signifie qu'il permet une convergence « en moyenne » vers la solution exacte au problème. En d'autres termes, moyenner les résultats de deux simulations réalisées avec le path-tracing permet d'obtenir un résultat plus proche de la solution exacte.

On peut en effet considérer que le calcul de la contribution le long d'un seul chemin constitue déjà une approximation de la solution exacte. Dans le cas de scènes très simples dans lesquelles les chemins possibles ne sont pas très nombreux, par exemple lorsque l'on observe un simple plan, il suffira de très peu de rayons pour obtenir un résultat acceptable. Pour des scènes plus complexes, il faudra par contre générer un plus grand nombre de chemins.

4.2.2 Détails des calculs

Luminance issue de la source

La source utilisée dans LuxRender est une source ponctuelle dont on fixe l'intensité $I_s = 1$. Cette source est à l'origine, dans la direction $\vec{\omega_s}$, d'une luminance L_s caractérisée par :

$$I_s = L_s \cos\theta_s dS \qquad [\text{W. sr}^{-1}] \tag{4.2.11}$$

et d'un éclairement défini par :

$$E_s = L_s \cos\theta_s d\omega_s \qquad [\text{W. m}^{-2}] \tag{4.2.12}$$

Réflexion de la luminance des sources

Une fois un point P_k trouvé, le premier calcul à réaliser est celui de la réflexion de la luminance reçue de la part de la source par le point P_k et réfléchie dans la direction de P_{k-1}. Pour cela la simple définition de la BRDF nous donne, en utilisant l'éclairement de la source donné par l'équation 4.2.12 :

$$L_{s,k,k-1} = BRDF_k(\vec{\omega}_{k,s}, \vec{\omega}_{k,k-1}).L_s.\cos\theta_s d\omega_s. \qquad [\text{W. m}^{-2}.\text{ sr}^{-1}] \tag{4.2.13}$$

La luminance L_s issue de la source est fonction de l'angle θ formé par la direction d'émission avec la direction centrale du cône d'émission laser de sorte que la distribution de l'intensité laser à l'intérieur du faisceau suive la distribution Gaussienne introduite en 2.2.2.

Réflexion de la luminance du point suivant

De la même manière, on calcule la réflexion de la luminance $L_{k+1,k}$ issue du point P_{k+1} et incidente sur le point P_k grâce à l'éclairement équivalent :

$$E_{k+1,k} = L_{k+1,k} \cos\theta_{k+1,k} d\omega, \qquad [\text{W. m}^{-2}] \tag{4.2.14}$$

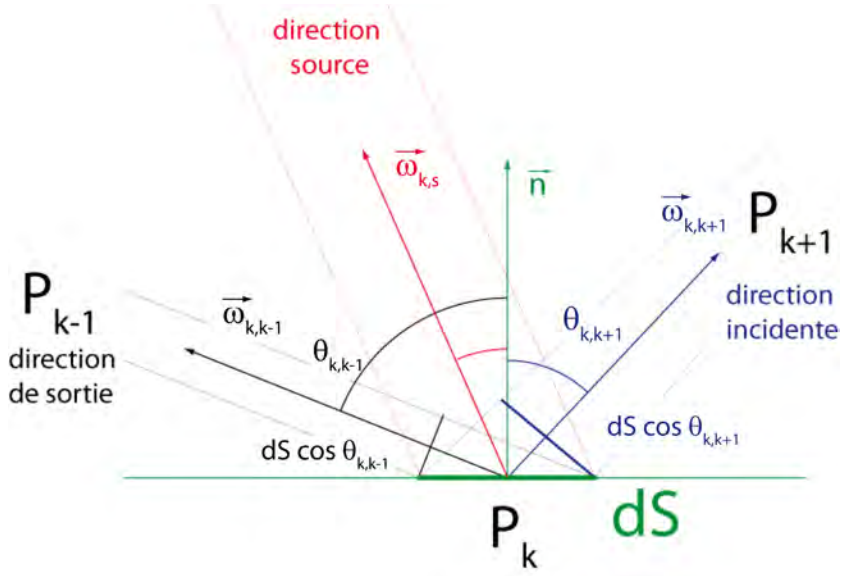


Figure 4.3 – *Paramétrisation du calcul de réflectance et de luminance en un point P_k du chemin.*

et l'on exprime la luminance $L_{k,k-1}$ réfléchie vers le point P_{k-1} grâce à la définition de la BRDF :

$$\begin{aligned} L_{k,k-1} &= BRDF_k(\vec{\omega}_{k+1,k}, \vec{\omega}_{k,k-1}) E_{k+1,k} \\ &= BRDF_k(\vec{\omega}_{k+1,k}, \vec{\omega}_{k,k-1}) L_{k+1,k} \cos\theta_{k+1,k} d\omega \end{aligned} \qquad [\mathrm{W.\ m^{-2}.\ sr^{-1}}] \qquad (4.2.15)$$

d'où l'expression du facteur de réflexion des luminances :

$$f_k = BRDF_k(\vec{\omega}_{k+1,k}, \vec{\omega}_{k,k-1}) \cos\theta_{k,k+1} d\omega. \qquad (4.2.16)$$

Surfaces semi-transparentes

Dans le cas des surfaces semi-transparentes, un choix aléatoire est effectué avec une probabilité identique entre le phénomène à traiter : réflexion ou transmission. La transmission en P_k de la luminance $L_{k+1,k}$ issue du point P_{k+1} et incidente sur P_k est calculée de la même façon que dans le cas de la réflexion à ceci près que c'est la fonction de transmittance bi-directionnelle (BTDF) qui est utilisée à la place de la BRDF. La transmission donne donc lieu à un facteur de transmission :

$$f_k = BTDF_k(\vec{\omega}_{k+1,k}, \vec{\omega}_{k,k-1}) \cos\theta_{k,k+1} d\omega. \qquad (4.2.17)$$

4.2.3 Calcul de la réponse impulsionnelle

Après avoir choisi une direction de départ (à partir du capteur), et calculé les luminances et facteurs de reflectance en chaque point P_k d'un chemin limité à N points, l'algorithme de path-tracing a permis de calculer N contributions c_k (certaines pouvant être nulles, notamment si le chemin s'est arrêté faute d'objet intersecté), ainsi que N distances parcourues d_k assimilables à des temps de parcours t_k .

Du point de vue du signal lidar, cela revient à avoir calculé une valeur approchée $\tilde{\mathcal{I}}_i$ de la réponse impulsionnelle $\mathcal{I}$ pour le chemin i, que l'on peut exprimer en réécrivant simplement l'équation 4.2.5 :

$$\tilde{\mathcal{I}}_i(t) = \sum_{k=1}^{N} c_k \delta(t - t_k). \qquad [\mathrm{W.\ m^{-2}.\ sr^{-1}}] \tag{4.2.18}$$

On a noté :

$$\begin{aligned} c_0 &= L_{s,1,0}, \\ c_k &= \left(\prod_{i=1}^{k-1} f_i \right) L_{s,k,k-1}, \\ t_k &= \frac{d_k}{c}. \end{aligned}$$

Le caractère non biaisé de l'algorithme de path-tracing nous permet alors de calculer une valeur approchée du signal lidar onde complète en suivant un grand nombre de chemins et en calculant la moyenne des réponses impulsionnelles obtenues.

$$\mathcal{I}(t) \simeq \frac{1}{N_{chemins}} \sum_{i=1}^{N_{chemins}} \tilde{\mathcal{I}}_i(t). \qquad [\mathrm{W.\ m^{-2}.\ sr^{-1}}] \tag{4.2.19}$$

A ce stade, nous avons donc estimé une réponse impulsionnelle $\mathcal{I}(t)$ du lidar onde complète homogène à une luminance. Il s'agit de la luminance issue d'une impulsion laser idéale infiniment brève d'intensité totale unitaire diffusée par la scène vers le lidar. On note ici qu'il ne s'agit donc pas exactement de la même réponse impulsionnelle qui avait été introduite en 2.4.2, réponse impulsionnelle qui était alors celle correspondant à une puissance émise unitaire. Les deux réponses impulsionnelles diffèrent donc en fait d'un facteur $1/\Omega_i$.

4.2.4 Bilan, sources d'erreurs

Le path-tracing permet donc, à partir de la description maillée d'une géométrie, et des propriétés optiques de chaque facette, d'estimer la réponse impulsionnelle d'un instrument lidar onde complète défini dans un premier temps uniquement par sa position, son orientation, l'angle de divergence de son laser et le champ de vision de son capteur.

Les seules sources d'erreur liées au principe de simulation seront les limitations :

- De la longueur du chemin à N points. Cette approximation revient à négliger les diffusions d'ordre supérieur à N.

- Du nombre de chemins tracés. Un compromis temps de calcul / précision de la simulation apparait. Plus la scène simulée possède une géométrie complexe, plus le nombre de chemins tracés devra être élevé.

L'utilisation d'un outil existant permet d'asseoir les développements futurs sur une base solide. L'algorithme de path-tracing de LuxRender est capable, grâce à des algorithmes d'accélération de la recherche d'intersection, de traiter très rapidement des géométries complexes.

Il aurait été compliqué de développer par nous même un outil de lancer de rayon capable de gérer des scènes contenant plus d'un million de facettes triangulaires tout en prenant en compte les diffusions multiples, et ceci avec des temps de calcul inférieurs à la minute.

De plus, l'existence d'une communauté d'utilisateurs et de développeurs autour de LuxRender nous laisse entrevoir la possibilité de profiter dans un futur proche de nouveaux développements autour du modèle. Parmi ces améliorations, citons par exemple le passage sur GPU du moteur de lancer de rayon qui devrait permettre d'accélérer encore les calculs, ou l'implémentation d'un nouveau type de source pour le soleil et l'atmosphère qui permettra peut-être de s'affranchir du modèle Modtran sur ce point.

4.3 Modèles de soleil et d'atmosphère

Afin de modéliser la mesure lidar dans son intégralité, il apparait important d'étudier les effets de l'environnement sur celle-ci. On traite ici deux effets :

- La mesure par le capteur d'une luminance solaire diffusée par la scène dans sa direction. On suppose ici que le capteur lidar est sensible dans une bande de largeur $\delta\lambda = 1nm$ autour de la longueur d'onde λ du lidar. Dans ces conditions, on s'attend à ce que la contribution du soleil soit très faible en regard de la contribution du laser. Néanmoins, afin de vérifier cette assertion et de traiter les cas extrêmes (puissance laser faible, distances élevées), nous avons mis en place dans DELiS une modélisation directe de la diffusion de la luminance solaire et de fond de ciel vers le capteur lidar. Le modèle exposé ici n'a pas vocation à fournir une valeur précise de cette composante, plutôt à fournir un ordre de grandeur. Pour cette raison, certains aspects du modèle pourraient être plus approfondis. Nous négligeons également la contribution solaire due uniquement à la diffusion par l'atmosphère pour nous concentrer sur la diffusion de la luminance solaire par la scène vers le capteur.

- L'atténuation de la puissance lumineuse lors de la propagation de l'impulsion laser vers la scène et lors de la propagation du signal rétrodiffusé vers le capteur. On suppose ici que cette atténuation peut être modélisée par un simple facteur de transmission atmosphérique dont la valeur dépend du type d'atmosphère, des d'aérosols présents ainsi que de la géométrie de la ligne de visée (distance parcourue, angle de visée).

Nous présentons dans cette section la modélisation de ces deux effets grâce au couplage de DELiS avec le modèle de transfert radiatif Modtran. Les grandeurs manipulées (éclairements, luminances, transmission atmosphérique) sont implicitement considérées comme des grandeurs spectrales intégrées sur la bande spectrale de sensibilité du capteur lidar, que l'on suppose être de largeur $1nm$ autour de la longueur d'onde lidar.

4.3.1 Simulation de la composante solaire

Modèle de soleil et de ciel de LuxRender

LuxRender dispose d'une source de lumière permettant de simuler un ensemble « soleil + ciel » grâce à un modèle du type « Perez all-weather sky model » (*Perez* et al. *(1993)*). Ce modèle est surtout utilisé pour réaliser des rendus d'images numériques avec un aspect du ciel et un éclairement à l'aspect (voir figure 4.4).

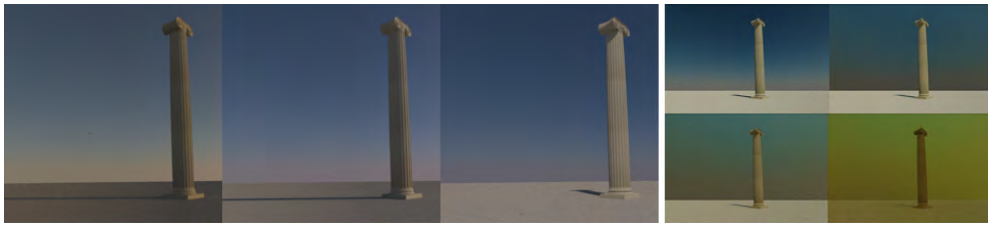


Figure 4.4 – *Exemples de rendus d'images réalisés grâce à LuxRender avec sa source hémisphérique de soleil et de ciel. A gauche, impact de l'angle solaire. A droite, impact de la turbidité. Source :* `http://www.luxrender.net/wiki/LuxRender_Lighting`.

Les paramètres de ce modèle sont :
- La direction solaire $\vec{d}_{sun}$.
- La turbidité t_{LUX} : c'est un indicateur du caractère diffus du fond de ciel. Plus la valeur est élevée, plus l'éclairement du ciel sera étalé sur une zone large autour du soleil. Les valeurs de la turbidité sont généralement comprises entre 2 et 8, $t = 2$ correspondant à un ciel clair (visibilité 25km) et $t = 8$ correspondant à un ciel brumeux (visibilité 5km).
- Le gain G_{LUX} : ce paramètre permet d'ajuster l'intensité des éclairements solaire et diffus. Dans la suite, nous allons nous en servir pour obtenir un éclairement total réaliste.

Lors d'une exécution de l'algorithme de path-tracing, pour chaque point touché sur une surface solide de la scène, la source « soleil + ciel » de type hémisphérique est échantillonnée par un nombre n de rayons fixé au départ (après quelques tests, on fixe $n = 10$, valeur suffisante pour que la contribution solaire calculée soit bien échantillonnée). Grâce à ces n rayons lancés, la contribution de la source « soleil + ciel » à la luminance diffusée par le point concerné est estimée. On calcule ainsi par path-tracing la luminance diffusée depuis le soleil et le ciel vers le capteur lidar en tenant compte des diffusions multiples dans la scène.

L'inconvénient du modèle de LuxRender est de n'être pas étalonné par des grandeurs physiques réelles, et a fortiori pas à la longueur d'onde précise qui nous intéresse. Il permet cependant de rendre compte des problèmes d'interactions entre l'éclairement de fond du ciel et du soleil et de la géométrie complexe de la scène. Nous avons donc décidé d'utiliser ce modèle tout en l'étalonnant grâce au modèle de transfert radiatif Modtran.

Modèle d'atmosphère et d'éclairement solaire : Modtran

Le modèle Modtran *Berk* et al. *(1987)* permet de simuler un éclairement du ciel dans une direction donnée pour un modèle d'atmosphère, un modèle d'aérosols et une visibilité donnés. En réalisant une séquence de simulations puis une intégration sur l'angle solide, on peut calculer l'éclairement total $E_{tot,MOD}$ issu du ciel et du soleil.

Les paramètres d'entrée sont les suivants :
- Longueur d'onde λ considérée. Comme on l'a déjà expliqué, on calculera la valeur de l'éclairement total dans une bande spectrale de $1nm$ centrée sur λ.
- Le modèle standard d'atmosphère désigné par un entier. Les différents modèles disponibles sont donnés dans la table 4.1.

- Le type d'aérosols désigné par un entier. Les différents aérosols disponibles sont donnés dans la table 4.2 .
- La visibilité en kilomètres. Le modèle d'aérosol implique souvent le choix d'une visibilité en relation.

Une fois ces paramètres fixés, Modtran permet d'obtenir l'éclairement total (soleil + ciel) en bas de l'atmosphère. Nous allons utiliser cette valeur pour étalonner la source de LuxRender afin que ce dernier renvoie une composante solaire + ciel radiométriquement correcte.

Table 4.1 – *Modèles d'atmosphère Modtran tels que désignés dans la documentation technique du modèle.*

	Modèle d'atmosphère Modtran
1	Tropical atmosphere (15° North Latitude)
2	Mid-Latitude Summer (45° North Latitude)
3	Mid-Latitude Winter (45° North Latitude)
4	Sub-Arctic Summer (60° North Latitude)
5	Sub-Arctic Winter (60° North Latitude)
6	1976 US Standard Atmosphere

Table 4.2 – *Modèles d'aérosols Modtran tels que désignés dans la documentation technique du modèle. Certains types sont dépendants de la visibilité. Pour les valeurs intermédiaires de visibilité, Modtran procède à une interpolation.*

	Modèle d'aérosol Modtran
1	RURAL extinction, default visibility = 23km
2	RURAL extinction, default visibility = 5km
3	NAVY MARITIME extinction, visibility based on wind speed and relative humidity
4	MARITIME extinction, default visibility = 23km
5	URBAN extinction, default visibility = 5km
6	TROPOSPHERIC extinction, default visibility = 50km
8	FOG1 (Advective Fog) extinction, visibility = 0.2km
9	FOG2 (Radiative Fog) extinction, visibility = 0.5km
10	DESERT extinction, visibility from wind speed

Etalonnage de la source LuxRender grâce à la simulation Modtran

On rappelle que Modtran permet de calculer l'éclairement total en bas de l'atmosphère $E_{tot,MOD}$ à partir du jeu de paramètres suivants :
- Le type d'atmosphère ;
- Le type d'aérosols ;
- La longueur d'onde λ (on suppose une bande spectrale de largeur $1nm$) ;
- La visibilité atmosphérique (en km) ;
- La direction solaire.

LuxRender couplé au modèle DELiS permet quant à lui de calculer une luminance réfléchie $L_{r,LUX}$ vers un capteur fictif lorsque l'on donne les paramètres suivants :
- La turbidité t_{LUX} ;
- Une valeur de gain G_{LUX}.

Pour étalonner la source de LuxRender, on va donc simuler une scène de référence identique avec LuxRender et Modtran. La scène choisie est un plan horizontal de réflectance Lambertienne $\rho = 1$ éclairé par le soleil au zénith.

Le calcul par Modtran de l'éclairement total $E_{tot,MOD}$ permet de déduire la valeur théorique de la luminance rétrodiffusée vers le capteur fictif :

$$L_{r,MOD} = \frac{\rho}{\pi} E_{tot,MOD} \tag{4.3.1}$$

Afin de réaliser une simulation identique avec LuxRender, il faut établir une correspondance entre les paramètres en entrée de Modtran (type d'atmosphère, type d'aérosols, visibilité) et la turbidité de LuxRender. Etablir une telle relation n'est pas chose facile. De nombreux auteurs se sont penchés sur la question et les réponses apportées sont multiples et complexes. Pour des raisons de simplicité et de rapidité, tout en gardant à l'esprit l'objectif fixé, à savoir l'estimation d'un ordre de grandeur plutôt que d'une valeur très précise, nous utilisons ici une loi empirique basée sur les valeurs globalement admises pour la turbidité. Celle-ci varie entre 2 pour un ciel très clair (visibilité 25km) et 8 pour un ciel très chargé en aérosols (visibilité 5km). En l'absence d'informations plus fiables, nous avons choisi d'utiliser une loi empirique linéaire reliant la visibilité à la turbidité conformément à ces correspondances.

Une fois cette relation établie, le parallèle entre les deux modèles peut être réalisé, et on fixe la valeur du gain de LuxRender afin que la valeur renvoyée pour $L_{r,LUX}$ soit égale à la valeur théorique $L_{r,MOD}$. Cet ajustement du gain G_{LUX} par étalonnage grâce au modèle Modtran est schématisé sur la figure 4.5.

Exemple de simulation

Lors de l'utilisation de DELiS, l'utilisateur fournit un modèle d'atmosphère et de soleil grâce aux paramètres suivants :
- Type d'atmosphère (au sens de modtran) ;
- Type d'aérosol (au sens de modtran) ;
- Visibilité ;
- Direction solaire.

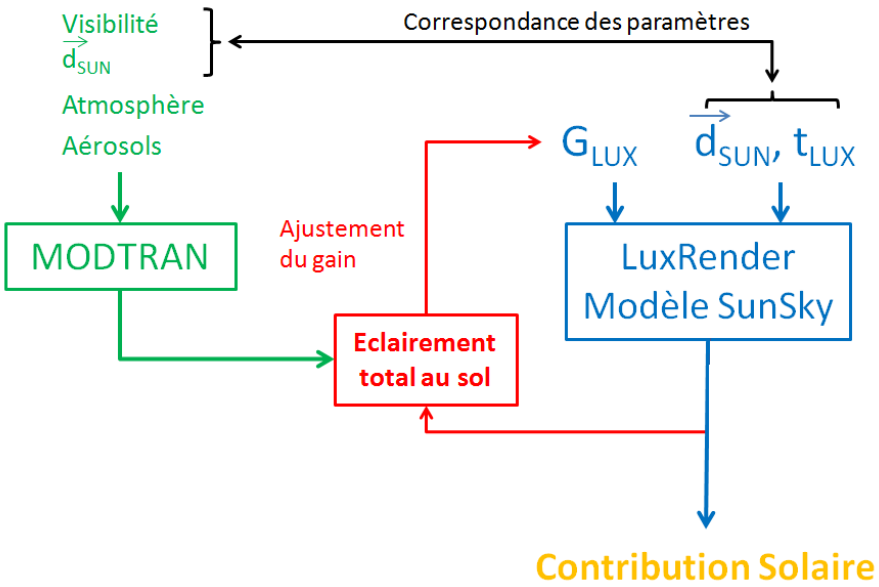


Figure 4.5 – *Schéma de principe de fonctionnement du modèle d'éclairement solaire de DELiS. Le modèle de transfert radiatif Modtran est utilisé pour ajuster la valeur du gain G_{LUX} de LuxRender et assurer une estimation correcte de l'éclairement solaire total à la longueur d'onde laser.*

Le modèle DELiS paramètre automatiquement une série de simulations Modtran permettant de calculer l'éclairement total « soleil + ciel » pour un soleil au zénith et pour la longueur d'onde du lidar choisie par ailleurs. A chaque lancement d'une simulation avec DELiS, Modtran est utilisé pour calculer la valeur de l'éclairement « soleil + ciel ». La valeur calculée permet de régler le paramètre de gain de la source LuxRender afin d'obtenir par la suite une simulation radiométriquement correcte.

Afin de tester le bon fonctionnement du modèle d'éclairement solaire et céleste, nous avons conçu une scène synthétique simple et nous avons simulé son observation par un scanner laser aéroporté. Pour chaque signal simulé, il est possible d'extraire du modèle DELiS la valeur de la luminance rétrodiffusée provenant du soleil et du ciel, et de stocker cette information. La figure 4.6 montre la géométrie de la scène simulée, ainsi que l'image reconstruite à partir des luminances solaires simulées par DELiS.

La scène de test se compose de deux arbres et de deux pavés disposés sur un sol plan. Tous les matériaux sont dotés de réflectances Lambertiennes. Le soleil est situé à l'arrière de la scène et illumine avec une incidence de 45°. Cette scène simple permet de vérifier que plusieurs phénomènes sont pris en compte :

- Les réflectances des matériaux sont correctement prises en compte comme en témoignent les valeurs indiquées sur la figure 4.6. La contribution solaire c simulée pour le sol dont la réflectance vaut $\rho = 0.3$ est bien trois fois supérieure à celle du pavé situé en haut à droite dont la réflectance vaut $\rho = 0.1$. Nous faisons la même constatation avec la contribution solaire simulée sur le second pavé de réflectance $\rho = 0.8$.
- La direction solaire est bien prise en compte comme l'indique la direction de projection des ombres. Les phénomènes d'ombrages sont donc bien pris en compte.

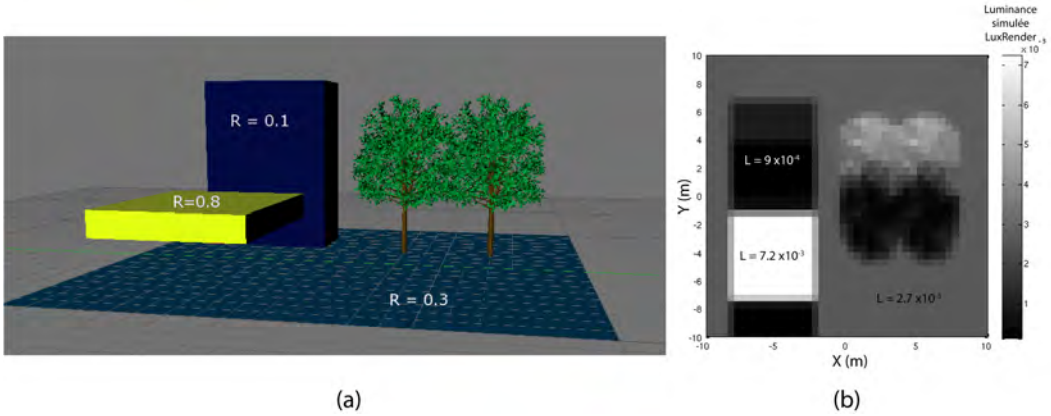


Figure 4.6 – *Scène modélisée pour tester le modèle d'éclairement solaire (a) et image reconstituée à partir des luminances solaires simulées (b).*

- L'ombre diffuse projetée par les arbres montre que leur géométrie complexe est prise en compte.
- Les contours des ombres des pavés ne sont pas francs (pénombre), ce qui tend à prouver que l'éclairement du fond de ciel (dominé par les parties proches du soleil) est pris en compte.

4.3.2 Prise en compte de l'extinction atmosphérique

Le couplage de DELiS avec Modtran mis en place pour la simulation du soleil permet par ailleurs de se doter d'un moyen de calcul précis de la transmission atmosphérique le long de la ligne de visée. En utilisant les mêmes paramètres d'entrée pour les types d'atmosphère et d'aérosols que précédemment, et en ajoutant la donnée de la configuration de visée (altitude du capteur, distance à la cible, angle de visée), on calcule avec Modtran la transmission atmosphérique τ_{atm} qui sera ensuite appliquée multiplicativement une fois à la contribution solaire (pour prendre en compte le trajet cible-capteur), et deux fois à la contribution du laser (pour prendre en compte le trajet aller-retour).

La même transmission atmosphérique τ_{atm} est appliquée à la luminance reçue par le capteur au cours du temps. On réalise ici une approximation consistant à supposer que la distance parcourue entre la cible et le capteur est grande par rapport aux écarts de distances parcourues par les différentes parties du signal, ce qui est généralement acceptable (on observe des écarts maximum de $30m$ entre le premier et le dernier écho pour des distances à l'instrument de l'ordre du kilomètre).

4.3.3 Conclusion

Le couplage de DELiS avec le modèle de transfert radiatif Modtran permet de prendre en compte de manière dynamique la contribution de l'éclairement de fond de ciel dans le signal lidar. La méthode mise en place, bien que possédant quelques points faibles (relation entre la turbidité et la visibilité, invariance de la distribution angulaire de l'éclairement solaire vis-à-vis de la longueur d'onde), permet d'évaluer un ordre de grandeur afin de juger de l'importance de la luminance solaire et du fond de ciel contribuant au signal lidar. L'algorithme de path-tracing permet en effet d'estimer celle-ci en tenant compte des diffusions multiples dans la scène ainsi que des phénomènes d'ombrage.

Cette estimation prend également en compte la transmission atmosphérique le long du premier trajet soleil-scène, puisque Modtran fournit l'éclairement solaire en bas de l'atmosphère. On supposera par la suite que la luminance solaire réfléchie vers le capteur L_{sun} ne varie pas au cours du temps, elle vient donc s'ajouter à la luminance issue du laser et diffusée vers le capteur comme une simple constante.

De plus, le modèle Modtran permet de fournir à DELiS une estimation de la transmittance atmosphérique τ_{atm} à partir de la donnée d'un modèle d'atmosphère, d'un type d'aérosol et d'une donnée de visibilité.

4.4 Modèle d'instrument pour DELiS

Afin de simuler la totalité d'un système lidar, il nous faut maintenant nous interroger sur la détection et la mesure de ce signal lumineux. Dans cette section, nous présentons le modèle simple implémenté dans DELiS pour la chaine de détection, d'amplification et de numérisation du signal.

4.4.1 Synthèse de la luminance reçue par le lidar

Conformément à ce qui a été vu dans le chapitre 2, nous supposerons par la suite que l'impulsion laser émise est de forme Gaussienne, caractérisée par sa durée à mi-hauteur $\delta t_{1/2}$ (égale au tiers de la durée totale δt) et son énergie totale E_i. On rappelle que la variation temporelle de l'intensité émise par le laser pendant la durée d'une impulsion s'écrit :

$$I_i(t) = I_{crete} e^{-4\ln(2)\left(\frac{t}{\delta t_{1/2}}\right)^2} \tag{4.4.1}$$

Il nous est alors possible d'exprimer la luminance $L_r(t)$ reçue par le lidar en fonction de la réponse impulsionnelle $\mathcal{I}(t)$ estimée par le path-tracing, de la luminance diffusée issue du soleil et du ciel L_{sun}, et de la transmission atmosphérique τ_{atm} :

$$L_r(t) = \tau_{atm} L_{sun} + \tau_{atm}^2 (I_i \star \mathcal{I})(t) \tag{4.4.2}$$

La luminance incidente $L_r(t)$ est alors collectée conformément à ce qui a été vu en 2.5.1, et la puissance finalement incidente sur le détecteur s'écrit :

$$P_r(t) = L_r(t) S_c \Omega_c \tag{4.4.3}$$

où S_c est la surface de collection du capteur et Ω_c l'angle solide de champ de vision du détecteur.

4.4.2 Mesure et amplification du signal

La puissance $P_r(t)$ reçue au cours du temps est d'abord échantillonnée à la fréquence d'échantillonnage f_e du système (généralement de l'ordre du giga-hertz). On traite alors successivement les énergies reçues pendant les intervalles de temps successifs de longueur $\delta t_e = 1/f_e$.

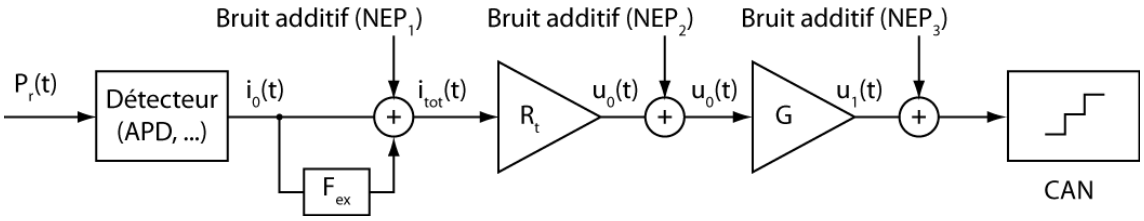


Figure 4.7 – *Chaîne de détection et d'amplification du signal.*

La figure 4.7 expose les différentes étapes de conversion et d'amplification du signal. Ce modèle de chaine de détection a été élaboré à partir des résultats exposés dans *Richmond et Cain (2010)* et *Rocadenbosch Burillo (1996)*. Il n'a pas la prétention de décrire précisément le fonctionnement interne d'un capteur, mais plutôt de proposer un modèle cohérent permettant d'appréhender les ordres de grandeur des différentes sources de bruit.

Table 4.3 – *Paramètres instrumentaux typiques tirés de Mallet et Bretar (2009), Rocadenbosch Burillo (1996) et Richmond et Cain (2010).*

Paramètre	Unité	Valeur
longueur d'onde	nm	1557
ifov illumination	mrad	0.5
durée impulsion (à 1%)	ns	9
énergie impulsion	μJ	8
ifov observation	mrad	0.7
diamètre récepteur	m	0.1
efficacité quantique		0.7
Gain APD		10
$F_{ex,APD}$		5.52
NEP APD	$pA.Hz^{-\frac{1}{2}}$	0.4
Gain transimpedance	$k\Omega$	4
NEP transimpedance	$nV.Hz^{-\frac{1}{2}}$	28
G ampli		18
NEP ampli	$nV.Hz^{-\frac{1}{2}}$	7
f_{sample}	GHz	1
U_{min} CAN	V	0
U_{max} CAN	V	7
n_{bits} CAN		8

Dans un premier temps, le flux d'énergie lumineuse est converti en intensité électrique par une photodiode à avalanche (APD) qui va également amplifier une première fois le signal (voir section 2.5.2). Le courant électrique ainsi produit est généralement d'une intensité très faible (quelques μA). Afin de le rendre exploitable, il est nécessaire de procéder à son amplification, une première fois par une transimpédance R_t produisant une tension de l'ordre de quelques mV, puis une seconde fois par un amplificateur classique. Il pourra alors être numérisé au moyen d'un convertisseur analogique-numérique codant le signal reçu sur n_{bits} bits.

Les bruits intervenant sur la chaîne de détection sont de deux types. On trouve des bruits additifs comprenant les effets de bruit thermique dans la photodiode (voir 2.5.2), ainsi que des bruits additionnels intervenant à chaque étape d'amplification supplémentaire. Le bruit

multiplicatif dit « d'excès de bruit » lié au processus d'amplification dans la photodiode à avalanche est également pris en compte (voir 2.5.2). Enfin, la quantification du signal de sortie par le convertisseur analogique-numérique entraine intrinsèquement un bruit (voir 2.5.2) dont la variance devra être comptabilisée dans les bilans de rapport signal à bruit.

La table 4.3 donne des valeurs typiques pour les paramètres de ce modèle d'instrument. Par la suite et en l'absence de mention contraire, ce sont ces paramètres instrumentaux qui seront utilisés pour la simulation du lidar onde complète.

4.4.3 Bilan global et ordres de grandeurs

Considérons un instrument dont les caractéristiques sont données dans la table 4.3. L'observation d'une scène de végétation produit des signaux dont un exemple est représenté sur la figure 4.8.

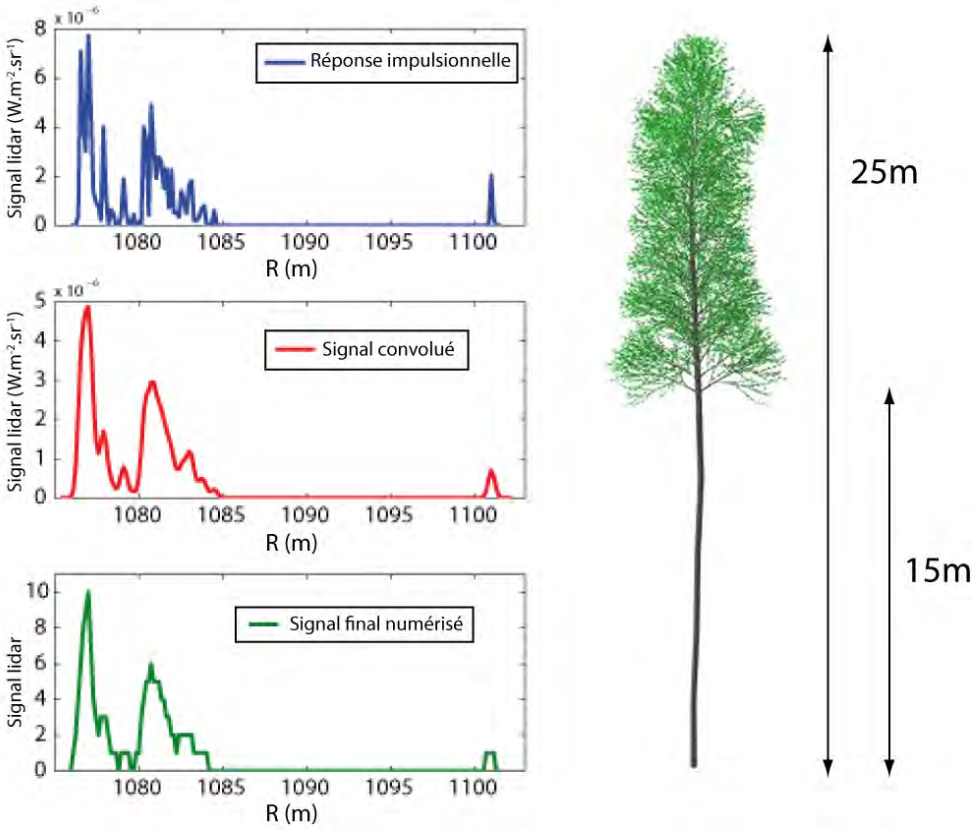


Figure 4.8 – *Signal lidar simulé sur une scène de végétation. De haut en bas : réponse impulsionnelle telle que calculée par le moteur de path-tracing, signal optique incident en entrée d'instrument, signal final produit par le capteur. L'arbre observé est présenté sur la droite. Il s'agit d'un aulne (voir chapitre 5). On retrouve sur les signaux l'écho de sol, situé à* 1100*m du capteur, et une série d'échos renvoyés par le feuillage de l'arbre.*

La réponse impulsionnelle est estimée grâce au path-tracing. On la convolue ensuite par la forme temporelle de l'impulsion laser émise pour obtenir la luminance incidente sur le capteur. Enfin, la simulation de la conversion, de l'amplification et de la numérisation du signal produit un signal représentatif du type de données fournies par un instrument réel.

La figure 4.9 montre l'évolution du rapport signal à bruit moyen en fonction de la distance à la cible dans deux conditions atmosphériques différentes (avec une visibilité de 5km ou de 23km). Ces données ont été obtenues en simulant l'observation d'un plan horizontal de réflectance lambertienne $\rho = 0.5$ en visée nadir à différentes distances.

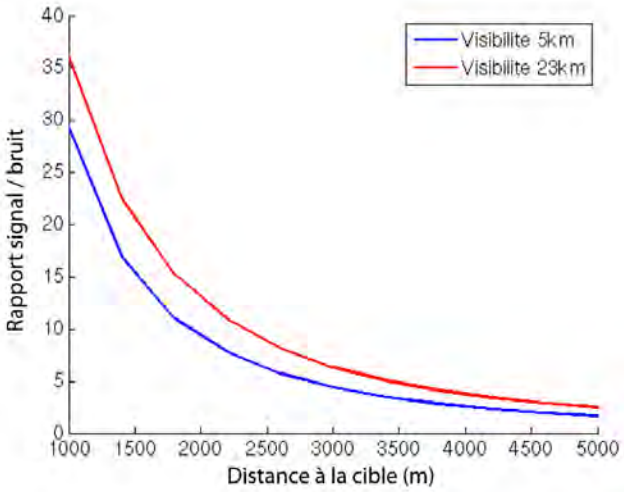


Figure 4.9 – *Rapport signal à bruit en fonction de la distance à la cible (plan lambertien de réflectance $\rho = 0.5$ en incidence normale).*

Si l'on considère que l'on est capable de discerner un écho Gaussien dans un bruit de fond de type « bruit blanc Gaussien » à partir d'un rapport signal à bruit de 7, il est possible d'estimer la distance maximale à laquelle il est possible de détecter l'écho lidar rétrodiffusé par une telle cible. Le résultat de l'estimation de la distance maximale d'observation pour une cible plane horizontale de réflectance lambertienne variable observée en visée nadir est présenté sur la figure 4.10.

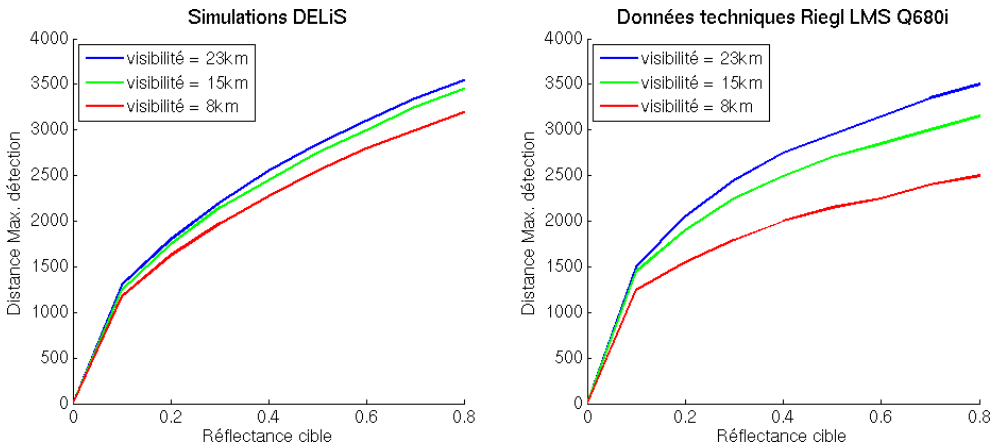


Figure 4.10 – *Comparaison des distances maximales de détection simulées avec DELiS et fournies dans la documentation technique du Riegl LMSQ680i (Riegl). Les distances maximales de détection sont présentées comme fonctions de la réflectance Lambertienne de la cible et pour trois conditions atmosphériques différentes.*

Il est comparé aux données fournies par le fabricant Riegl dans la fiche technique de son LMS Q680i (*Riegl*). Les paramètres du modèle instrumental sont ceux donnés dans la table 4.3. On a considéré que le LMS Q680i fonctionnait à sa fréquence minimale de scan (80 kHz). La figure 4.10 montre que le modèle instrumental implémenté pour DELiS produit un résultat comparable aux performances d'un système réel. La seule différence concerne une diminution plus rapide de la portée lorsque la visibilité diminue. Cet effet est probablement dû au fait que nous avons négligé dans DELiS la contribution solaire diffusée par l'atmosphère vers le capteur. Aux bonnes visibilités, cette contribution est négligeable, mais il est possible qu'elle devienne plus importante lorsque la quantité d'aérosols dans l'atmosphère augmente. Il est également possible que le calcul du rapport signal sur bruit diffère de celui que nous utilisons, en particulier sur l'inclusion ou non du bruit de fond à ce dernier.

4.5 Conclusion

Nous avons présenté ici le modèle DELiS développé au cours de la thèse pour la simulation du lidar onde complète. Ce modèle s'articule en plusieurs parties :

- Le calcul de la diffusion de l'impulsion sur les éléments de la scène est réalisé grâce à l'algorithme de path-tracing du logiciel de lancer de rayon open-source LuxRender.
- Le modèle de transfert radiatif Modtran est ensuite utilisé pour l'estimation de l'atténuation atmosphérique le long de la ligne de visée.
- Ce même modèle Modtran est également couplé à LuxRender pour l'estimation de la contribution solaire et céleste diffusée par la scène vers le capteur.
- Nous avons ensuite développé un modèle instrumental permettant de rendre compte du comportement d'un instrument réel.

Le modèle DELiS est muni d'une interface graphique permettant une prise en main rapide pour la simulation de signaux lidar onde complètes à partir d'une scène décrite par sa géométrie et ses propriétés optiques. Dans le chapitre suivant, nous nous attachons à la réalisation d'un modèle réaliste de forêt utilisable avec le modèle DELiS.

Le caractère modulaire du modèle DELiS permettra de le faire évoluer aisément par la suite. Les premières améliorations à apporter concernent principalement le calcul de la contribution solaire, seule la partie réfléchie par la scène ayant été estimée pour l'instant. Un modèle de transfert radiatif externe pourra être utilisé de manière similaire à Modtran pour l'estimation de la luminance solaire et céleste diffusée par l'atmosphère vers le capteur.

Le modèle instrumental pourra également être perfectionné grâce à l'apport de davantage d'informations sur des systèmes réels.

Enfin, il est également envisageable d'utiliser une approche similaire à celle utilisée dans DELiS pour modéliser d'autres systèmes d'imagerie active. Le calcul de la propagation de l'impulsion laser émise grâce à LuxRender pourrait en effet être exploité de manière différence de façon à permettre la simulation de systèmes flash, flash 3D ou de lidars matriciels.

Chapitre 5

Modélisation des scènes pour DELiS

Sommaire

5.1 Introduction **67**
5.2 Modélisation de la végétation **67**
5.2.1 Propriétés macroscopiques des couverts végétaux 67
5.2.2 Modèles d'arbres complexes 69
5.3 Propriétés optiques des matériaux **70**
5.3.1 Modèle de propriétés optiques des feuilles 70
5.3.2 Autres matériaux présents dans les scènes 75
5.4 Application : la forêt estonienne de Järvselja **76**
5.4.1 Données disponibles 77
5.4.2 Hypothèses simplificatrices 77
5.4.3 Propriétés optiques des matériaux 80
5.5 Conclusion **82**

5.1 Introduction

Au fil des chapitres précédents, nous avons élaboré un modèle permettant de simuler un signal lidar onde complète réaliste pour une géométrie quelconque.

Notre objectif final étant la simulation de signaux représentatifs de l'observation réelle d'une scène de forêt, la modélisation de la géométrie du couvert végétal en lui-même est donc tout aussi importante que la modélisation de la mesure.

Ce chapitre présente les possibilités offertes par le modèle DELiS pour la modélisation de couverts végétaux, tant du point de vue de la géométrie des feuillages que des propriétés optiques des matériaux.

Pour conclure cet effort de modélisation, nous présenterons la scène de forêt réaliste que nous utiliserons largement par la suite.

5.2 Modélisation de la végétation

5.2.1 Propriétés macroscopiques des couverts végétaux

Une première représentation simple d'un couvert végétal consiste à supposer qu'il est constitué de feuilles réparties aléatoirement dans l'espace, leur positions et orientations sui-

vant une loi statistique. Cette approche est similaire au concept de végétation turbide mentionné dans le chapitre 3 à ceci près qu'il s'agit ici de générer un modèle de feuillage, et non de simuler la propagation de la lumière à l'intérieur d'un volume.

Afin de générer un couvert végétal de ce type, on définit une loi de distribution pour la disposition géométrique des feuilles, généralement une distribution uniforme dans l'espace, et une loi de distribution pour l'orientation des feuilles. La section suivante présente les grandeurs usuelles utilisées pour la description macroscopique des couverts végétaux.

LAI et densité foliaire

La densité foliaire ρ_f est le paramètre le plus intuitif lorsqu'il s'agit de chiffrer la densité d'un couvert végétal. Elle s'exprime en m^{-3} et consiste simplement en un recensement du nombre de feuilles par m^3 de couvert végétal.

Pourtant, la densité foliaire n'est pas un paramètre très utile pour caractériser la capacité d'une canopée à laisser passer ou non la lumière. En effet, le nombre de feuilles est une information insuffisante si l'on ne tient pas compte des caractéristiques de ces feuilles (leur surface par exemple) et de leur distribution. On pourrait donc imaginer définir un paramètre qui mesurerait la surface de feuilles par m^3 de feuillage. Pour des raisons liées à l'observation des couverts végétaux, on a choisi de définir le LAI (Leaf Area Index, index surfacique foliaire) comme la surface totale de toutes les feuilles (en ne comptant qu'une seule face) situées à la verticale d'un m^2 de surface au sol. Le LAI est donc un paramètre adimensionné. Les valeurs typiques pour le LAI vont de 0 pour un sol nu, à 6 pour une forêt très dense.

Un couvert végétal de densité foliaire ρ_f et de surface totale $S_{tot,canopée}$, composé de feuilles de surface moyenne $S_{feuille}$ disposées dans un volume d'épaisseur verticale H possède un LAI :

$$LAI = \frac{S_{tot,feuilles}}{S_{tot,canopée}} = \rho_f H S_{feuille} \tag{5.2.1}$$

En l'absence d'informations supplémentaires, on suppose généralement que les feuilles sont distribuées avec une densité de probabilité homogène dans le couvert végétal.

Orientation des feuilles et LAD

Le LAI ou la densité foliaire permettent donc de quantifier la quantité de feuilles et la surface totale des feuilles d'une canopée. Cependant, ces deux notions ne tiennent pas compte de l'orientation des feuilles, laquelle va fortement influer sur l'interception de la lumière. Pour prendre en considération l'orientation des feuilles d'une canopée, on introduit la notion de LAD (Leaf Angle Distribution) (*De Wit (1965)*), il s'agit de la fonction de distribution de l'orientation des normales aux feuilles.

L'orientation θ d'une feuille est habituellement définie comme l'angle formé entre le vecteur normal à la feuille (supposée plane) et la direction verticale (modulo $\pi/2$). Ainsi une feuille horizontale (à plat) aura un angle d'orientation nul, et une feuille verticale aura un angle d'orientation maximal ($\pi/2$ radians). Le LAD est défini comme une fonction de distribution classique, en exprimant que le nombre total de feuilles de la canopée dont l'orientation est comprise entre θ et $\theta + d\theta$ est :

$$N([\theta;\theta+d\theta]) = LAD(\theta)d\theta \tag{5.2.2}$$

La notion de LAD permet de calculer l'angle foliaire moyen de la canopée comme :

$$\theta_{moy} = \frac{2}{\pi}\int_0^{\frac{\pi}{2}} \theta LAD(\theta)d\theta \tag{5.2.3}$$

Une autre notion utile sera le facteur de projection moyen des surfaces des feuilles. C'est le facteur qui intervient lorsque l'on cherche à calculer la surface apparente d'une feuille vue depuis une certaine direction. L'expression générale de ce facteur n'est pas évidente, on peut toutefois l'écrire dans le cas où la direction d'observation est la direction verticale descendante (visée nadir) :

$$\alpha =< \cos\theta >= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos\theta LAD(\theta)d\theta \tag{5.2.4}$$

De Wit (1965) a défini six lois de distribution usuelles pour l'orientation des feuilles dans un couvert végétal dont les expressions sont données en annexe A. La distribution la plus utilisée en l'absence d'informations plus détaillées est le LAD sphérique :

$$LAD(\theta) = \sin\theta \tag{5.2.5}$$

Conclusion

Etant donnés un LAI, ou une densité foliaire, une loi de LAD, une géométrie pour une feuille individuelle, il est possible de construire un volume simulant un feuillage possédant, en moyenne, les propriétés macroscopiques voulues. Ce type de modèle pourra servir à valider le modèle DELiS (voir chapitre 6), mais aussi à modéliser une forêt composée d'arbres dont les couronnes pourront prendre diverses formes géométriques (cônes, ellipsoïdes, ...). De telles canopées pourront servir à valider certains principes fondamentaux du transfert radiatif dans les couverts végétaux, mais elles s'avèreront rapidement insuffisantes. En effet, une forêt réelle possède une diversité géométrique dans la répartition de son feuillage qu'il serait vain de vouloir modéliser par des lois analytiques de distribution. C'est pourquoi nous préférerons par la suite utiliser des modèles géométriques d'arbres plus réalistes.

5.2.2 Modèles d'arbres complexes

La génération de modèles d'arbres précis et réalistes est une discipline scientifique à part entière. Des outils très sophistiqués permettent de modéliser des arbres en prenant en compte leur croissance dans leur environnement ainsi qu'un très grand nombre de paramètres. Ces outils génèrent généralement des modèles 3D d'arbres très précis mais également très volumineux, c'est à dire composés d'un très grand nombre de facettes triangulaires.

Comme nous avons pu le voir au cours du chapitre 3, un trop grand nombre de facettes triangulaires augmente beaucoup les temps de calcul du modèle de lidar. Pour cette raison, nous devrons réaliser un compromis entre le réalisme des modèles d'arbres, et le nombre de facettes triangulaires les composant.

Modèles d'arbres de l'initiative RAMI

Dans le cadre de l'initiative RAMI (Radiative transfer Model Intercomparison, intercomparaison de modèles de transfert radiatif), le JRC (Joint Research Center) met à disposition une série de modèles d'arbres permettant de générer des scènes de végétation (voir figure 5.1).

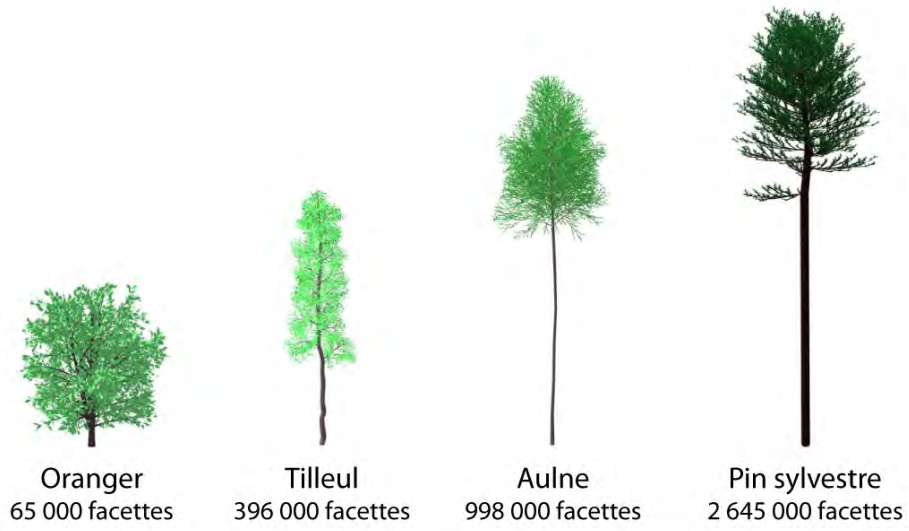


Figure 5.1 – *Exemples de modèles d'arbres fournis par le JRC dans le cadre de l'initiative RAMI IV (source : `http://rami-benchmark.jrc.ec.europa.eu/HTML/RAMI-IV/RAMI-IV.php`)*

Cependant, ces modèles d'arbres comportent pour certains jusqu'à plusieurs millions de facettes triangulaires. Dans ces conditions, il serait seulement possible, avec DELiS, de simuler l'observation d'une parcelle comportant au maximum un ou deux arbres, ce qui est bien sûr insuffisant. Pour pouvoir utiliser les modèles de RAMI, nous devrons donc les simplifier afin de pouvoir modéliser une parcelle complète de forêt (voir section 5.4).

5.3 Propriétés optiques des matériaux

5.3.1 Modèle de propriétés optiques des feuilles

La question des propriétés optiques des feuilles a été largement abordée depuis de nombreuses années, et de nombreux modèles et mesures sont disponibles dans la littérature. Une caractérisation précise des propriétés optiques de la surface des feuilles est présentée par *Bousquet (2007)*. Il montre, mesures à l'appui, que le modèle le plus adapté à la description précise des feuilles est celui d'une surface semi-transparente, dont la transmittance est Lambertienne, et dont la réflectance possède un comportement du type « Lambertien + spéculaire » pouvant être décrit par un modèle du type Cook-Torrance (*Cook et Torrance (1982)*). Cependant, on dispose rarement d'une connaissance complète des paramètres décrivant le caractère spéculaire de la réflectance de telle ou telle feuille, et nous devrons souvent nous en tenir à un modèle plus simple, si tant est que l'approximation réalisée n'entraine pas une trop grande erreur dans la simulation de la mesure lidar onde complète.

La modélisation des surfaces dans LuxRender, et donc dans DELiS permet aisément d'utiliser pour les feuilles les trois modèles suivants :

- Une surface opaque munie d'une réflectance du type « Lambertien + spéculaire ».
- Une surface semi-transparente munie d'une réflectance Lambertienne ainsi que d'une transmittance Lambertienne également.
- Une surface opaque de réflectance Lambertienne.

Afin de choisir la manière la plus appropriée de modéliser les propriétés optiques des feuilles, nous nous proposons dans cette section d'évaluer l'impact des caractères semi-transparent et Lambertien des feuilles sur le signal lidar onde complète.

Impact de la transmittance des feuilles sur le signal lidar

La figure 5.2 montre un signal lidar simulé sur une canopée homogène du type de celles décrites en 5.2 ($LAI = 6$, LAD sphérique, épaisseur $10m$), pour des feuilles totalement opaques ($\rho_f = 0.5$) et semi-transparentes ($\rho_f = 0.5$ et $\tau_f = 0.4$). Les réflectances et transmittances Lambertiennes ont été prises pour une longueur d'onde laser $\lambda = 1064nm$. Cette figure permet de montrer que pour une petite taille d'empreinte au sol ($0.5m$ de diamètre), la prise en compte de la transmittance des feuilles est peu importante. Par contre, à mesure que la taille du faisceau laser augmente (donc pour des instruments aéroportés volant à des altitudes supérieures, ou pour des instruments spatiaux), l'effet de la transmittance des feuilles n'est plus négligeable, puisque sa prise en compte induit une augmentation de près de 20% de l'énergie totale collectée.

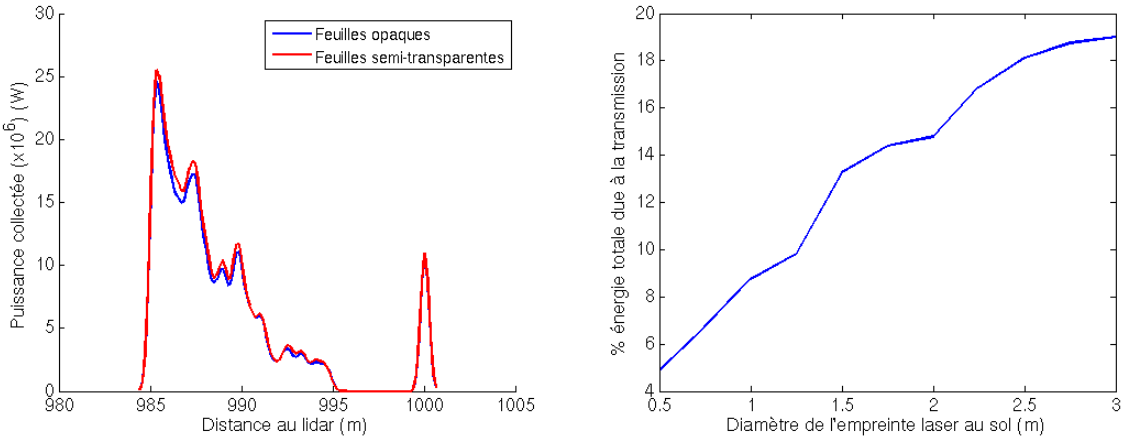


Figure 5.2 – *A gauche, signaux lidar simulés pour une couche de végétation homogène ($LAI = 6$, LAD sphérique, épaisseur $10m$) à une longueur d'onde laser $\lambda = 1064nm$ en prenant en compte ou non le caractère semi-transparent des feuilles. Le lidar est situé à une altitude $Z = 1000m$ et observe le sol en visée nadir. L'empreinte laser au sol a un diamètre de $0.5m$. A droite, fraction de l'énergie totale collectée due au caractère semi-transparent des feuilles en fonction de la taille de l'empreinte laser au sol.*

Impact du caractère non-Lambertien de la réflectance des feuilles

Afin de dépasser les limites des modèles purement lambertiens ou spéculaires, il est possible de considérer une surface réfléchissante comme une distribution statistique de micro-facettes se comportant comme des réflecteurs spéculaires. En se basant sur les travaux de *Cook et Torrance (1982)* et de *Beckmann et Spizzichino (1987)* pour la formulation de la distribution de l'orientation des facettes ainsi que pour le facteur d'atténuation géométrique, *Bousquet (2007)* formule le modèle de BRDF dit de Cook-Torrance de la façon suivante :

$$BRDF(\lambda, \theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v) = \frac{k_L(\lambda)}{\pi} + \frac{F(n, \theta_a)G(\theta_s, \theta_v, \alpha, \theta_a)}{4\pi\sigma^2 \cos\theta_v \cos\theta_s} \times \frac{e^{-\left(\frac{\tan\alpha}{\sigma}\right)^2}}{\cos^4\alpha} \tag{5.3.1}$$

λ est la longueur d'onde du rayonnement considéré, (θ_s, φ_s) décrivent la direction d'illumination (Source) et (θ_v, φ_v) la direction d'observation dans un repère sphérique lié à la surface caractérisée. Ce modèle de BRDF ne fait intervenir que trois paramètres : la réflectance lambertienne $k_L(\lambda)$, l'indice de réfraction n du matériau, et le paramètre de rugosité σ. Les variables angulaires θ_a et α sont des intermédiaires géométriques simplifiant la formulation, ils sont donnés en fonction des angles d'illumination et d'observation par les relations :

$$\cos(2\theta_a) = \cos\theta_s \cos\theta_v + \sin\theta_s \sin\theta_v(\cos\varphi_s \cos\varphi_v + \sin\varphi_s \sin\varphi_v) \tag{5.3.2}$$

$$\cos\alpha = \frac{\cos\theta_s + \cos\theta_v}{2\cos\theta_a} \tag{5.3.3}$$

Le facteur de Fresnel $F(n, \theta_a)$ et le facteur d'atténuation géométrique $G(\theta_s, \theta_v, \alpha, \theta_a)$ sont donnés par les relations :

$$F(n, \theta_a) = \frac{1}{2}\left(\frac{g - \cos\theta_a}{g + \cos\theta_a}\right)^2 \left[1 + \frac{(\cos\theta_a(g + \cos\theta_a) - 1)^2}{(\cos\theta_a(g - \cos\theta_a) + 1)^2}\right] \tag{5.3.4}$$

$$\begin{cases} g^2 = n^2 + \cos^2\theta_a - 1 \\ G(\theta_s, \theta_v, \alpha, \theta_a) = min(1, E_1, E_2) \\ E_1 = \frac{2\cos\alpha\cos\theta_v}{\cos\theta_a} \\ E_2 = \frac{2\cos\alpha\cos\theta_s}{\cos\theta_a} \end{cases} \tag{5.3.5}$$

Une implémentation similaire au modèle de Cook-Torrance peut être utilisée pour décrire les propriétés optiques des surfaces utilisées avec DELiS. Le modèle de *Schlick (2003)* est une version simplifiée et optimisée du modèle de Cook-Torrance pour le rendu d'image numérique. C'est cette version du modèle qui est implémentée dans LuxRender, et que nous allons tester par la suite avec le modèle DELiS. De la même façon que le modèle de Cook-Torrance, le modèle de BRDF de Schlick dépend de trois paramètres : une réflectance dite « diffuse » R_D, une réflectance spéculaire R_S et un paramètre de rugosité ρ.

Afin de pouvoir modéliser une BRDF équivalente aux descriptions données grâce au modèle de Cook-Torrance par *Bousquet (2007)*, nous avons mis au point une méthode d'optimisation très simple permettant de passer d'un modèle à l'autre. Etant donné un jeu de paramètres (k_L, n, σ) décrivant une BRDF avec le modèle de Cook-Torrance, nous calculons le jeu de paramètres (R_D, R_S, ρ) décrivant une BRDF équivalente avec le modèle de Schlick. Pour comparer les deux modèles, nous nous sommes basés sur la BRDF dans le plan $\varphi_s = 0$ et pour une direction d'éclairement normale ($\theta_v = 0$ et $\varphi_v = 0$).

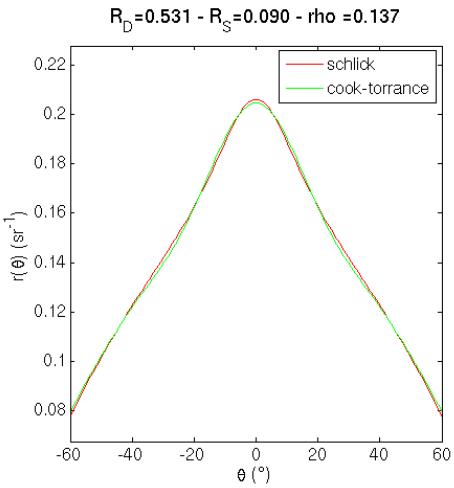


Figure 5.3 – *BRDF de feuille modélisée avec le modèle de Cook-Torrance pour des paramètres mesurés sur une feuille de hêtre (Bousquet (2007)), approximation du même modèle de BRDF grâce au modèle de Schlick. La BRDF est représentée ici dans le plan $\varphi_v = 0$ et pour une direction d'éclairement normale ($\theta_s = 0$ et $\varphi_s = 0$).*

La figure 5.3 montre les réflectances directionnelles obtenues avec les deux modèles. Nous avons au départ choisi un jeu de paramètres correspondant à des mesures réalisées sur une feuille de hêtre : $n = 1.56$, $\sigma = 0.29$, $k_L = 0.5$. Seul le choix de la réflectance lambertienne dépend de la longueur d'onde utilisée, *Bousquet (2007)* montre en effet que les paramètres n et σ peuvent être considérés comme invariants spectralement. Nous avons donc choisi pour la réflectance lambertienne k_L une valeur représentative de ce qui peut être rencontré dans le proche infra-rouge. Grâce à la méthode d'optimisation, nous avons déterminé les valeurs $R_D = 0.531$, $R_S = 0.09$ et $\rho = 0.137$ à utiliser avec le modèle de Schlick pour simuler un comportement similaire.

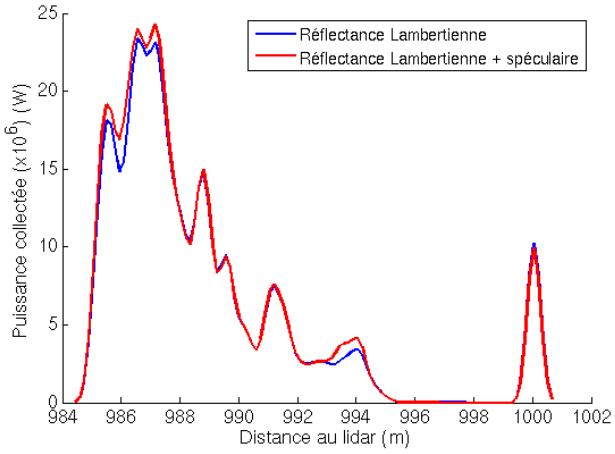


Figure 5.4 – *Comparaison des signaux simulés avec DELiS pour une couche de végétation homogène (LAI = 6, LAD sphérique, épaisseur 10m) à une longueur d'onde $\lambda = 1064nm$ en prenant en compte ou non le caractère partiellement spéculaire de la BRDF des feuilles.*

Nous avons alors pu évaluer grâce à DELiS l'impact du caractère spéculaire de la réflectance des feuilles. Pour cela, nous avons simulé l'observation d'une couche de végétation homogène ($LAI = 6$, épaisseur $10m$, LAD sphérique). La figure 5.4 montre les résultats obtenus pour une simulation en visée nadir avec un diamètre d'empreinte laser au sol de $0.5m$.

La comparaison des signaux simulés en tenant compte ou non du caractère spéculaire de la réflectance des feuilles tend à prouver que celui-ci peut être négligé. Notons également que l'on a comparé ici les signaux simulés en utilisant pour les feuilles une simple réflectance Lambertienne, puis la même réflectance Lambertienne assortie d'une composante spéculaire additionnelle. Il est donc normal de constater que l'énergie totale réfléchie dans le cas Spéculaire + Lambertien soit supérieure à celle rétrodiffusée dans le cas Lambertien seul. La réflectance hémisphérique des feuilles est en effet légèrement supérieure. Par la suite, nous utiliserons l'hypothèse de la réflectance Lambertienne en assimilant celle-ci à la réflectance hémisphérique totale de la feuille, si bien que cet écart sera partiellement compensé.

Propriétés spectrales

De nombreux spectres de réflectances et de transmittance hémisphériques ont été mesurés et sont disponibles, par exemple dans la base de donnée fournie avec le modèle DART (*Gastellu-Etchegorry* et al. *(1996)*). De telles données sont bien entendu précieuses, mais elles correspondent évidemment à une espèce d'arbre bien précise, et la probabilité de disposer justement des mesures correspondant au type d'arbre modélisé est finalement assez faible. Il faut en effet disposer d'un maillage 3D précis de la géométrie d'un arbre en plus des mesures des propriétés optiques de ses feuilles. De plus, les mesures de réflectance et de transmittance ne sont pas toujours réalisées dans une bande spectrale suffisamment étendue pour nos applications.

Une solution intéressante à ce problème de disponibilité des spectres est fournie par le modèle PROSPECT (*Jacquemoud et Baret (1990)*). Ce modèle permet en effet de simuler les spectres de réflectance et de transmittance d'une feuille standard à partir de la donnée de diverses propriétés telles que le contenu en eau, en chlorophylle, la quantité de matière sèche, etc... Grâce au modèle PROSPECT, nous disposons donc de propriétés optiques génériques pour les feuilles des arbres sur une bande spectrale élargie (de $400nm$ à $2500nm$). La figure 5.5 montre une comparaison entre les données simulées par le modèle PROSPECT et quelques données issues de mesures disponibles dans la base de données DART. Au vu de ces comparaisons, le modèle PROSPECT pourra être considéré comme une alternative fiable en cas de manques de mesures pour les propriétés des feuilles.

Conclusion sur les propriétés optiques des feuilles

Au vu des quelques expérimentations réalisées avec le modèle DELiS, nous avons décidé de nous orienter vers une modélisation des feuilles par des surfaces semi-transparentes possédant une réflectance et une transmittance Lambertiennes. Ce choix est motivé d'une part par le peu d'influence du caractère partiellement spéculaire de la réflectance des feuilles sur le signal lidar, et d'autre part par la difficulté à se procurer des mesures précises décrivant la BRDF réelle des feuilles ou sa modélisation par une réflectance partiellement spéculaire. Tous les spectres disponibles et présentés donnent en effet des mesures de la réflectance et de la transmittance hémisphériques, et ne sont donc utilisables que sous l'hypothèse Lambertienne.

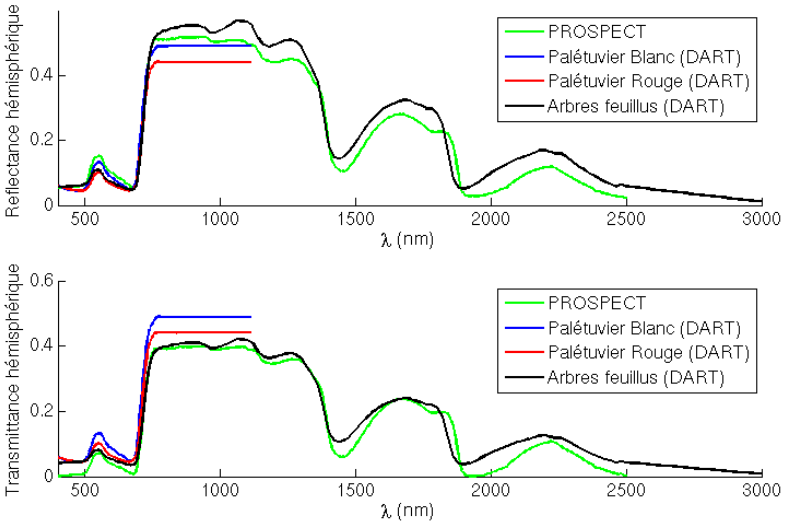


Figure 5.5 – *Exemples de données disponibles pour les propriétés optiques des feuilles. Les mesures issues de la base de données DART, sont comparées aux réflectances et transmittances simulées par PROSPECT. La mesure intitulée « arbres feuillus » correspond à la combinaison de mesures sur plusieurs arbres.*

Nous sommes néanmoins conscients que dans le cas d'essences d'arbres particulières, aux feuilles très lisses, la composante spéculaire de la réflectance des feuilles mise en avant par *Bousquet (2007)* pourrait ne plus être négligeable et nous tenons à attirer l'attention du lecteur sur la possibilité de prendre en compte ce type de BRDF avec le modèle DELiS. DELiS pourrait d'ailleurs également permettre de prendre en compte directement des BRDF mesurées expérimentalement.

5.3.2 Autres matériaux présents dans les scènes

Troncs et branchages

De la même façon que pour les feuilles, en l'absence de mesures plus détaillées des BRDF des branches des arbres, nous nous contenterons par la suite d'une réflectance Lambertienne.

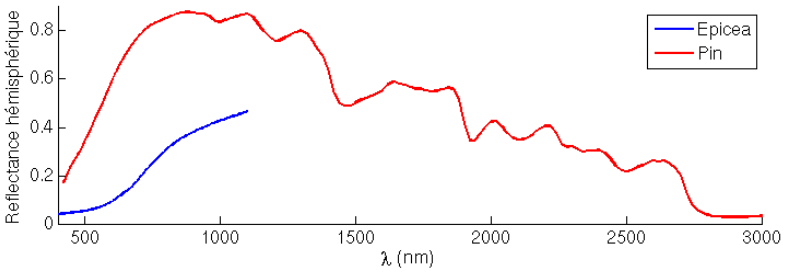


Figure 5.6 – *Exemples de mesures de réflectance hémisphérique pour des troncs (base de données DART).*

La figure 5.6 montre deux exemples de données disponibles dans la base de données DART pour les réflectances des branches et troncs.

Sol

Toujours en l'absence de mesures permettant de prendre en compte des modèles de BRDF plus précis, nous supposerons que les sols ont également une réflectance Lambertienne. La figure 5.7 montre quelques exemples de mesures de spectres pour les réflectances hémisphériques de sols de différentes natures.

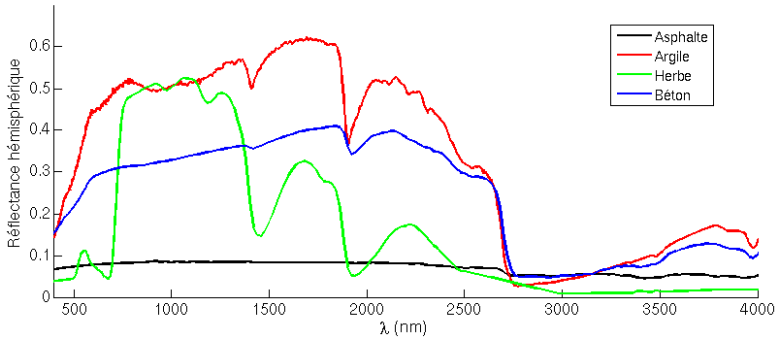


Figure 5.7 – *Exemples de mesures de réflectance hémisphérique pour des sols de différentes natures (base de données DART).*

5.4 Application : la forêt estonienne de Järvselja

Figure 5.8 – *Aperçus du modèle de forêt issu du recensement de Järvselja (Estonie).*

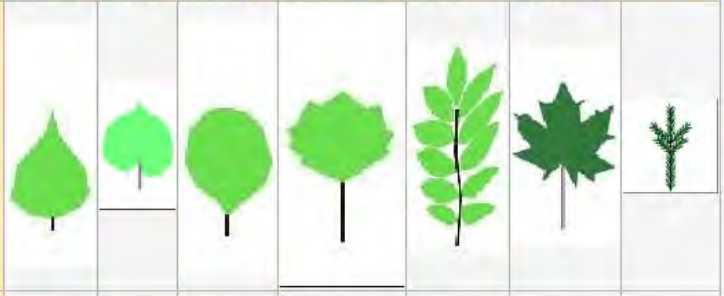
La forêt de Järvselja (figure 5.8) est une forêt de bouleaux (*Betula Pendula*) agée de 49 ans. Elle se situe aux environs des coordonnées géographique 58° 16'38"67 N 27° 20'30"38 E. Un inventaire de la parcelle a été réalisé à l'été 2007 par Andres Kuusk, Joel Kuusk, Mait Lang, Tõnu Lükk, Matti Mõttus, Tiit Nilson, Miina Rautiainen, et Alo Eenmäe du Tartu Observatory, Tõravere, Estonie et de l'Estonian University of Life Sciences, Tartu, Estonie.

Les données issues de l'inventaire sont disponibles sur le site web de l'initiative *RAMI*[1] qui regroupe les propriétés structurelles des arbres et de la forêt ainsi que les propriétés spectrales des différents matériaux.

5.4.1 Données disponibles

Le site de *RAMI* donne accès aux propriétés structurelles des feuillages et branchages des différentes espèces recensées. Les différentes espèces d'arbres présentes dans la scène ainsi que les propriétés de leurs feuilles sont présentées sur la table 5.1. Les espèces recensées sont le bouleau (Betula pendula, BEPE), le tilleul à petites feuilles (Tilia Cordata, TICO), l'aulne glutineux (Alnus Glutinosa, ALGL), le peuplier faux-tremble (Populus tremuloides, POTR), le frêne élevé (Fraxinus exelsior, FREX), l'érable plane (Acer platenoides, ACPL) ainsi que quelques épiceas communs (Picea abies, PIAB).

Table 5.1 – *Espèces d'arbres présentes dans la scène et propriétés de leurs feuillages.*

Tree species:	Betula pendula	Tilia cordata	Almus glutinosa	Populus tremuloides	Fraxinus exelsior	Acer platenoides	Picea abies
foliage shape:							
Max. foliage length	6.92 cm	10.42 cm	7.56 cm	8.08 cm	24.7 cm	18.8 cm	14.2 cm
Max. radial extent of foliage	2.58 cm	4.51 cm	2.72 cm	3.09 cm	8.70 cm	6.81 cm	3.56 cm
one-sided foliage area	20.7 cm²	52.5 cm²	23.4 cm²	18.8 cm²	176.6 cm²	139.6 cm²	83.2 cm²
twig length	0.5 cm	2.9 cm	1.0 cm	3.0 cm	16.1 cm	7.96 cm	3 - 6 cm#
twig diameter	0.3 cm	0.3 cm	0.3 cm	0.2 cm	0.3 cm	0.3 cm	0.3 cm
foliage curl	none	none	none	none	none	none	none

La parcelle modélisée est un carré d'environ $100m \times 100m$ planté de 1029 arbres pour un LAI moyen de 3.442 (table 5.2). Les positions des arbres sont données sur la figure 5.9. Les tables 5.3 et 5.4 donnent les propriétés structurelles de quelques arbres de chaque espèce. Ce sont ces arbres qui, une fois plantés dans la parcelle, constituent le modèle numérique de forêt.

5.4.2 Hypothèses simplificatrices

Afin de pouvoir utiliser ce modèle de forêt avec DELiS, plusieurs simplifications ont été nécessaires. Le modèle DELiS est capable de simuler des scènes comportant jusqu'à plusieurs millions de facettes triangulaires. Cependant, choisir un grand nombre de facettes dans la scène est au détriment de la rapidité des calculs, et pour simuler le balayage d'une scène par plusieurs centaines de signaux lidar, il apparait indispensable de se restreindre à

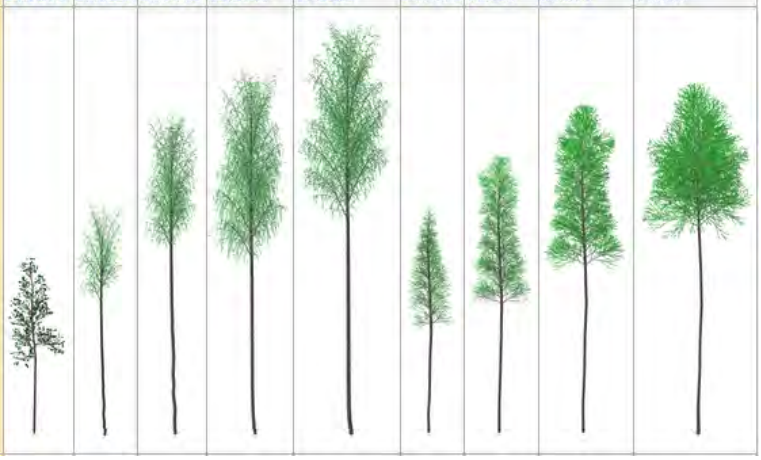
1. http ://rami-benchmark.jrc.ec.europa.eu/HTML/Home.php

Table 5.2 – *Propriétés globales de la scène.*

Scene dimensions: (ΔX × ΔY × ΔZ)	105.5115 × 106.1535 × 30.5130 [m × m × m]
(Xmin, Ymin, Zmin)	−2.6507, −2.9759, 0.0 [m, m, m]
(Xmax, Ymax, Zmax)	102.8608, 103.1776, 30.5130 [m, m, m]

Number of trees in scene	1029 (465 BEPE, 205 TICO, 196 ALGL, POTR 78, PIAB 39, FREX 30, ACPL 16)
Leaf Area Index of scene	3.442
Fractional scene coverage	0.5044

Table 5.3 – *Caractéristiques des arbres présents dans la scène (1/2)*

tree identifier	**ACPL**	**BEPE1**	**BEPE2**	**BEPE3**	**BEPE4**	**ALGL1**	**ALGL2**	**ALGL3**	**ALGL4**
tree height [m]	15.37	19.86	25.49	27.99	30.51	19.35	22.58	25.76	27.09
height to live/green crown [m]	7.57	12.93	16.43	15.23	18.36	10.14	12.60	14.46	16.95
crown radius mean [m]:	1.14	0.75	0.81	1.12	1.26	0.59	0.85	1.13	1.54
max [m]:	2.23	1.95	2.19	3.11	3.56	1.92	2.31	2.78	3.60
total foliage area of tree [m²]	13.6225	10.2282	32.2435	75.3714	93.9876	12.9206	29.3120	69.679	120.983
trunk DBH [cm]	11.5	11.5	17.5	26.0	31.0	15.0	21.0	28.0	35.0
total wood area of tree [m²]	14.9699	17.9155	37.2472	63.5946	67.1165	34.1871	47.251	50.279	73.082
tree shape image									

des géométries comportant moins d'un million de facettes. Les arbres proposés sur le site web de RAMI sont très complexes car très précisément décrits (voir section 5.2.2). Certains modèles comportent à eux seuls près de 800 000 facettes, ce qui restreint l'utilisation de DELiS à des portions de forêt ne comportant que quelques arbres. Afin de simuler de plus grandes parcelles, nous avons simplifié les modèles d'arbres pour gagner parfois un facteur 10 sur le nombre total de facettes. Les hypothèses simplificatrices réalisées sont les suivantes :

– **Suppression des espèces conifères** : Tout d'abord, en raison de la complexité de la modélisation des aiguilles de l'épicéa, et considèrant que cette espèce n'intervient qu'en petit nombre, et pour la végétation basse dans la scène, nous avons choisi de ne pas inclure à la forêt les arbres de l'espèce Picea Abies (Epicea commun, PIAB). Ces arbres de petite taille (1.82 m au dessus du sol, 10.9m de hauteur totale) comptent en effet pour 39 arbres sur les 1029 de la parcelle.

Table 5.4 – *Caractéristiques des arbres présents dans la scène (2/2)*

tree identifier	FREX	TICO1	TICO2	TICO3	TICO4	TICO5	PIAB	POTR1	POTR2
tree height [m]	13.72	5.91	11.27	14.41	18.34	20.70	10.90	25.27	30.49
height to live/green crown [m]	6.60	1.85	5.93	7.69	7.82	7.56	1.82	18.37	16.52
crown radius mean [m]:	1.02	1.26	0.79	0.98	1.02	1.07	0.50	1.36	1.21
maximum [m]:	2.25	2.55	1.93	2.38	2.47	2.65	1.60	2.65	3.15
half-total foliage area of tree [m²]	20.288	8.8554	18.073	27.528	58.319	92.0224	9.9413	37.7483	143.369
trunk DBH [cm]	9.5	7	9	12	15	17	10.5	17	28.0
total wood area of tree [m²]	11.267	5.8304	8.940	16.522	23.817	41.6288	9.0521	41.3079	103.829
tree shape image									

– **Simplification des feuillages** : Afin de diminuer le nombre total de facettes triangulaires dans la scène, nous avons choisi de remplacer les feuilles des arbres par de simples triangles dont la forme a été choisie pour respecter la surface totale de la feuille ainsi que son ratio longueur/largeur. Ce choix constitue une hypothèse plus ou moins simplificatrice suivant les espèces d'arbres.

– **Simplification des branchages** : Les structures de branchages proposées par RAMI sont très complexes, au point qu'un seul arbre peut comporter plus de 500 000 facettes triangulaires pour la seule description de ses branches et de son tronc. Il est donc absolument nécessaire de réduire le nombre de facettes employées pour décrire un branchage. Pour cela, nous avons employé un algorithme de simplification de maillage (utilisation avec *Meshalb* de l'algorithme de « quadric edge collapse decimation »).

Grâce à ces simplifications, nous sommes en mesure de modéliser entièrement la forêt estonienne de Järvsleja. Afin de rendre possible les simulations DELiS dans des temps raisonnables, un algorithme a été mis en place qui sélectionne et inclut dans la scène uniquement les arbres utiles à la simulation de la mesure lidar suivant une ligne de visée donnée.

Ce système d'accélération est basé sur la constatation suivante : une observation lidar pour une empreinte au sol de diamètre $0.5m$ ne nécessite pas la présence dans la scène modélisée des arbres les plus éloignés du lieu de la mesure. Nous avons donc développé un algorithme permettant, connaissant les conditions géométriques de visée du lidar, de n'inclure dans la scène modélisée que les arbres situés dans la zone avoisinant la mesure lidar onde complète. Lors de la simulation du balayage de la scène par un scanner laser aéroporté, nous pouvons donc construire pour chaque mesure lidar la portion de forêt nécessaire à la

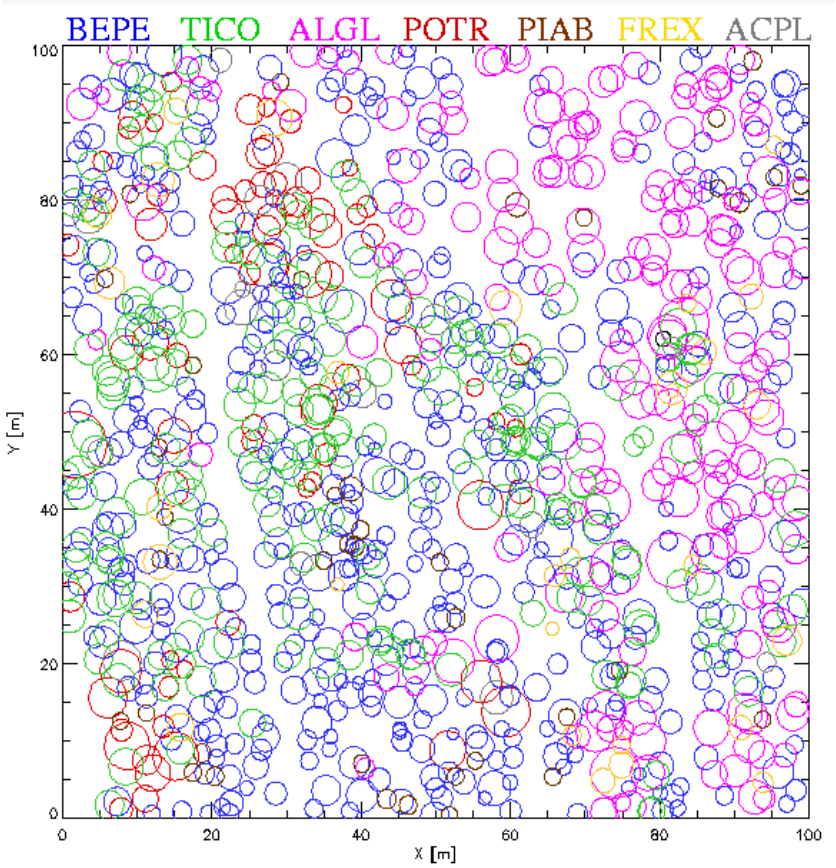


Figure 5.9 – *Position des arbres plantés. Les acronymes utilisés pour désigner les espèces d'arbres sont définis en 5.4.1.*

simulation. De cette façon, et même pour les visées obliques, il est possible de construire pour chaque mesure lidar une scène comportant rarement plus de 10 arbres et n'utilisant que les arbres effectivement vus par l'instrument. Pour chaque tir lidar successif, la construction de la scène minimale nécessaire et la simulation de la mesure sont réalisées en moins de 20 secondes, ce qui permet finalement de simuler l'observation de la forêt complète dans un temps tout à fait raisonnable.

Grâce à cet algorithme, nous sommes en mesure de générer des jeux de données simulées de plusieurs dizaines de milliers de signaux lidar distincts.

5.4.3 Propriétés optiques des matériaux

En accord avec ce qui a été expliqué dans la section 5.3.1, nous adopterons les hypothèses suivantes pour la modélisation des propriétés optiques des matériaux présents dans la scène :

- Les feuilles seront modélisées par des surfaces semi-transparentes possédant un réflectance et une transmittance lambertiennes.
- Les branches et les troncs des arbres seront modélisées par des surfaces opaques de réflectance lambertienne.
- Le sol sera modélisé par une surface opaque de réflectance lambertienne.

Toutes ces hypothèses sont en accord avec les recommandations formulées par RAMI.

Des données spectrales sont disponibles pour les réflectances et transmittances de tous les matériaux. Néanmoins, les données proposées sont largement incomplètes et ne couvrent qu'une petite partie du spectre.

Nous avons donc dû compléter ces données en réalisant les opérations suivantes :

- Les réflectances et transmittances pour les bandes spectrales manquantes entre différentes mesures disponibles ont été déduites par interpolation.
- Les spectres ont été complétés afin de couvrir les longueurs d'onde jusqu'à $2000nm$. Pour cela, nous avons utilisé les données simulées par PROSPECT pour les feuilles, et les mesures disponibles dans la base de données DART pour les branches, troncs et pour le sol. Cette opération a été réalisée tout en assurant la continuité entre les mesures RAMI et les mesures ajoutées pour compléter les spectres.

La figure 5.10 montre les données initialement disponibles ainsi que les spectres finalement reconstruits pour une exploitation sur toute la bande spectrale de $450nm$ à $2000nm$.

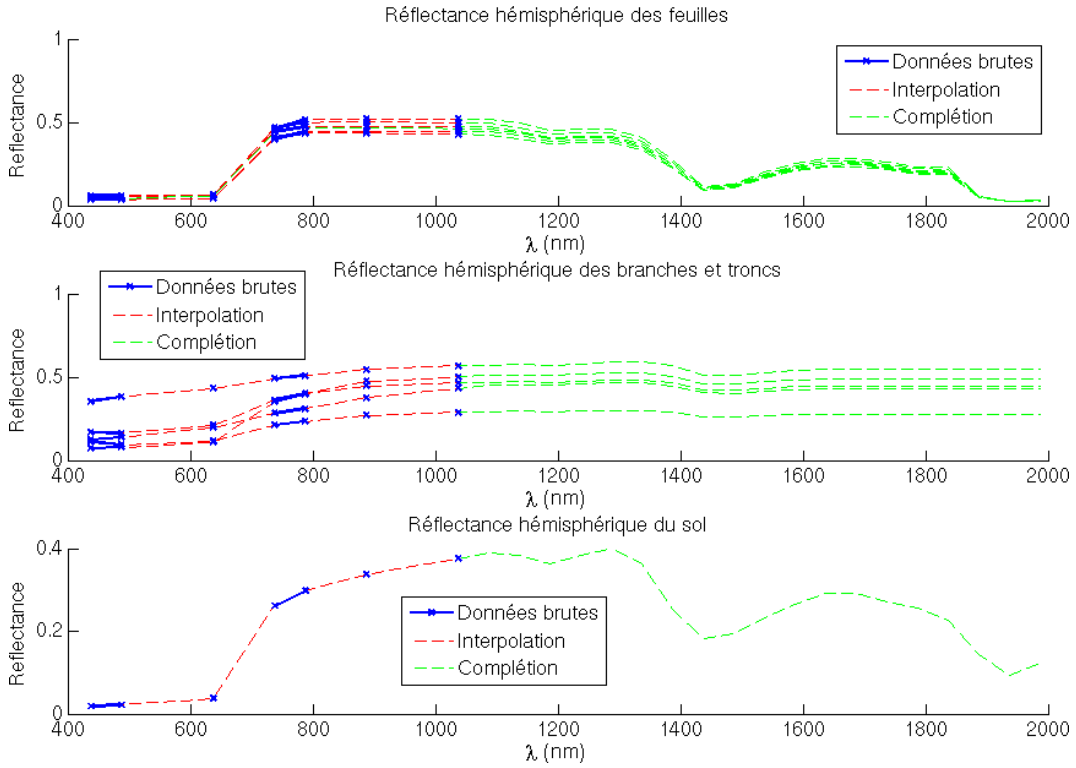


Figure 5.10 – *Visualisation des données de réflectances disponibles dans RAMI, et complétées par nos soins. Les transmittances des feuilles ont été traitées de la même façon.*

5.5 Conclusion

Une fois les arbres simplifiés et les propriétés optiques des matériaux complétées, nous avons été en mesure de modéliser une forêt au réalisme assez poussé. Afin d'améliorer notre modèle, nous avons ajouté la possibilité d'inclure un modèle numérique de terrain à la scène. Les arbres sont alors translatés selon la direction verticale afin d'épouser le relief.

Figure 5.11 – *Rendu d'image réalisé avec LuxRender sur une parcelle de la forêt de Järvselja comprenant 5 millions de facettes triangulaires. La scène initiale a été assortie d'un modèle numérique de terrain permettant de simuler un léger relief.*

La figure 5.11 montre un rendu d'image réalisé avec LuxRender à partir de la zone centrale de la forêt de Järvselja. La scène est composée des arbres simplifiés inclus à partir du centre et jusqu'à atteindre un total de 5 millions de facettes triangulaires.

Chacun de ces rendus d'image a nécessité plus de 30 minutes de calcul, ce qui est bien loin de l'objectif des 30 secondes pour une simulation lidar énoncé au chapitre 3. Tout d'abord ces deux durées ne sont pas exactement comparables, le rendu d'une image entière étant une opération plus complexe, et donc plus longue que la simulation d'un signal lidar pour une petite empreinte au sol. Cependant, dans le cas où l'on souhaite simuler l'observation d'une grande partie, voire de la totalité de la forêt par un scanner aéroporté, la grande quantité de facettes triangulaires est toujours rédhibitoire.

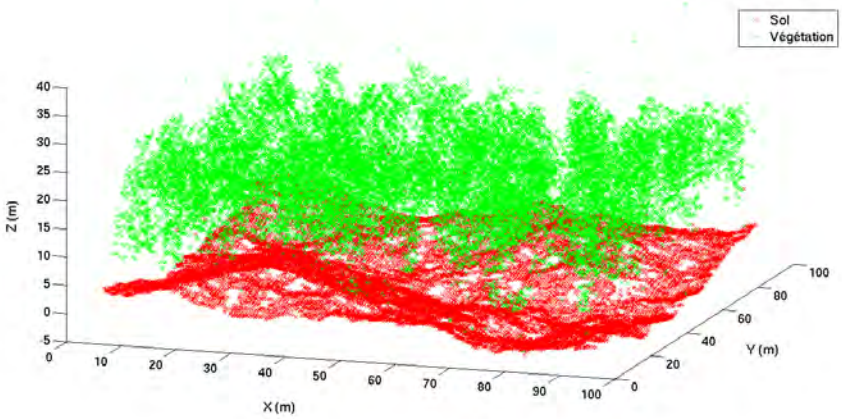


Figure 5.12 – *Nuage de points extrait d'un jeu de données simulé sur la forêt de Järvselja dans son ensemble, assortie d'un modèle numérique de terrain.*

Nous avons donc mis en place un système d'accélération permettant de construire la

scène minimale nécessaire à la simulation de chaque mesure lidar individuelle. Grâce à cet algorithme, nous sommes en mesures de simuler l'observation de la parcelle de forêt dans son intégralité (1 hectare).

La figure 5.12 montre un résultat de simulation obtenu grâce au modèle de forêt de Järvselja. 36 000 mesures lidar onde complète ont été simulées sur la totalité de la forêt ($100m \times 100m$). La simulation de chaque mesure durant environ 20 secondes, simuler la totalité du jeu de données a demandé environ huit jours et 8h de calculs. Le nuage de points a été extrait des signaux lidar grâce à la méthode de détection d'échos présentée plus loin (voir chapitre 7).

Chapitre 6

Validation du modèle DELiS

Sommaire

6.1 Introduction **85**
6.2 Tests de validation sur scènes simples **86**
6.2.1 Test 1 : La marche d'escalier 86
6.2.2 Test 2 : Taille de faisceau 87
6.2.3 Test 3 : Réflectance lambertienne 89
6.2.4 Test 4 : Plan incliné 89
6.2.5 Test 5 : Surface semi-transparente 91
6.3 Tests de validation sur végétation uniforme idéale **93**
6.3.1 Expression théorique du signal lidar onde complète 93
6.3.2 Simulations DELiS et comparaison 95
6.4 Vers la validation par comparaison à un système réel **97**
6.4.1 Présentation du matériel et du plan d'essais 97
6.4.2 Simulation prédictive des mesures avec DELiS 101
6.4.3 Mesures terrain et analyses préliminaires 105
6.4.4 Conclusion, points à travailler 107
6.5 Conclusion **108**

6.1 Introduction

La validation d'un modèle de lidar onde complète dédié à l'observation des couverts végétaux n'est pas une tâche aisée. Il est en effet quasiment impossible de disposer à la fois d'une observation réelle d'un couvert végétal ainsi que du modèle 3D le représentant précisément. C'est cette incapacité à produire une vérité terrain suffisamment précise sur les scènes de végétation qui nous pousse à envisager d'autres méthodes de validation pour le modèle DELiS que la comparaison à des mesures réelles.

Nous abordons dans ce chapitre la validation de notre modèle en quatre étapes :

- Dans un premier temps nous avons réalisé une série de tests simples qui garantissent le bon fonctionnement des fonctionnalités basiques du modèle. Des scènes géométriques canoniques (plans inclinés, plans semi-transparents, ...) nous permettent de vérifier que les signaux simulés sont conformes à certains principes de base.
- Nous nous attaquons ensuite au problème de la végétation en comparant les résultats de simulations DELiS obtenus avec une couche de végétation homogène à l'expression analytique du signal lidar onde complète calculable dans ce cas.

– Enfin, nous proposons une approche expérimentale afin de valider la partie instrumentale du modèle DELiS, et de comparer les simulations à des données réelles acquises sur des cibles synthétiques spécialement conçues.

6.2 Tests de validation sur scènes simples

Dans un premier temps, on cherche à valider les aspects les plus simples du modèle, sa prise en compte correcte de la géométrie des scènes, le respect des paramètres du système simulé, la bonne prise en compte des caractéristiques des matériaux, etc.

Pour réaliser ces vérifications, nous avons conçu une série de scènes abstraites, très simples, qui permettront d'isoler les phénomènes à tester.

Pour chaque test, les géométries ainsi que les paramètres du lidar sont listés. L'impulsion laser utilisée est toujours la même : elle possède une énergie unitaire, et a une durée de $3ns$ (à mi-hauteur). Les signaux lidar simulés peuvent donc être considérés comme normalisés en amplitude par l'intensité de la source. Ils sont représentés avec en abscisse la distance au lidar R. Il s'agit donc de la demi-distance parcourue par l'impulsion lumineuse.

6.2.1 Test 1 : La marche d'escalier

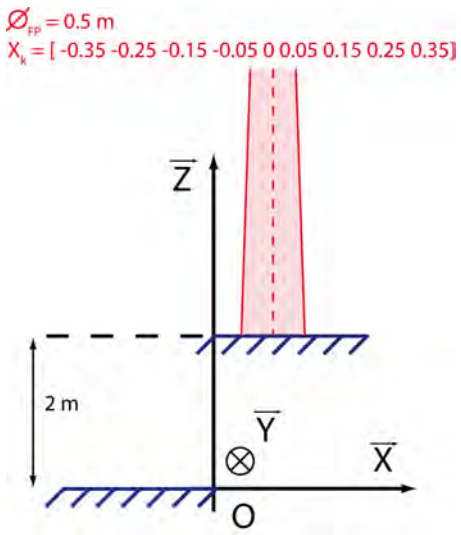
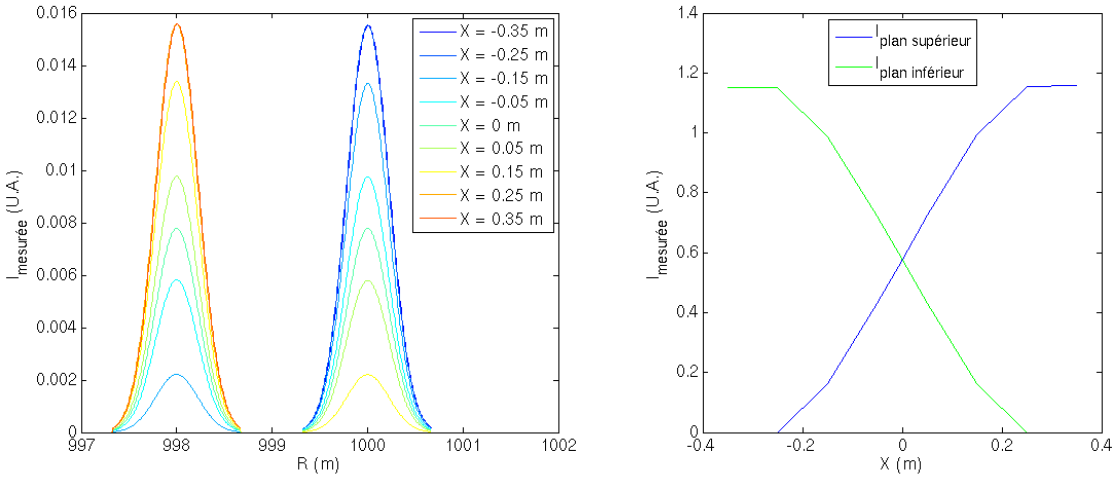


Figure 6.1 – *Scène de test numéro 1 : marche d'escalier. L'empreinte au sol du lidar vaut $\varnothing_{FP} = 50cm$, le lidar occupe successivement les positions $(X_k, 0, 1000)$.*

La scène simulée est présentée sur la figure 6.1. Elle est composée de deux plans de réflectance Lambertienne $R = 1$. Avec cette scène, on cherche à vérifier :

– Le calcul de distance. Le lidar étant placé en $Z = 1000m$, on vérifiera que les plans sont bien mesurés à des distances $d_1 = 998m$ et $d_2 = 1000m$.
– La détection de la marche : on vérifiera que deux échos lidar sont obtenus lorsque les deux plans sont visibles à l'intérieur du faisceau laser (lorsque $X \in]-0.25\ 0.25[$, le diamètre du faisceau laser au niveau du sol étant $\varnothing_{FP} = 0.5m$). On pourra également vérifier les amplitudes des deux échos en fonction de la position X du lidar.



(a) (b)

Figure 6.2 – *Signaux lidar onde complète simulés (a) et intensités totales rétrodiffusées en fonction de la position X du lidar (b)*

Les signaux obtenus présentent deux pics correspondant aux réflexions de l'impulsion laser sur les parties hautes et basses de la marche d'escalier. Conformément à ce que l'on pouvait attendre, les amplitudes des deux échos sont liées aux surfaces illuminées correspondantes. Ainsi lorsque $X = -0.35m$, le lidar observe uniquement la marche basse, on observe un seul écho. Même observation pour le cas où $X = 0.35m$. Lorsque le lidar illumine à part égale les deux plans ($X = 0$), on observe deux échos de même amplitude.

De ces résultats, on retire que :
- Les distances mesurées pour les deux plans sont correctes (l'examen des réponses impulsionnelles ne laisse aucun doute)
- Les amplitudes relatives des échos obtenus sont correctes, comme le montre la figure 6.2(b).

6.2.2 Test 2 : Taille de faisceau

La figure 6.3 montre la deuxième scène simulée. Il s'agit d'un cylindre placé sur un plan horizontal. Toutes les surfaces ont des réflectances Lambertiennes $R = 1$. Avec cette configuration, on cherche à tester :

- La taille du faisceau laser : en faisant varier la taille de l'empreinte au sol, on va pouvoir s'assurer que le plan n'est détecté que pour des tailles de faisceau supérieures au diamètre du cylindre.
- Les intensités rétrodiffusées : de la même manière que précédemment, on pourra s'assurer que les amplitudes des pics de rétrodiffusion varient proportionnellement à la surface concernée.

La figure 6.4(a) montre les signaux lidar simulés. Elle permet de vérifier que pour les tailles de faisceau inférieures à la dimension du cylindre, un seul écho est observé.

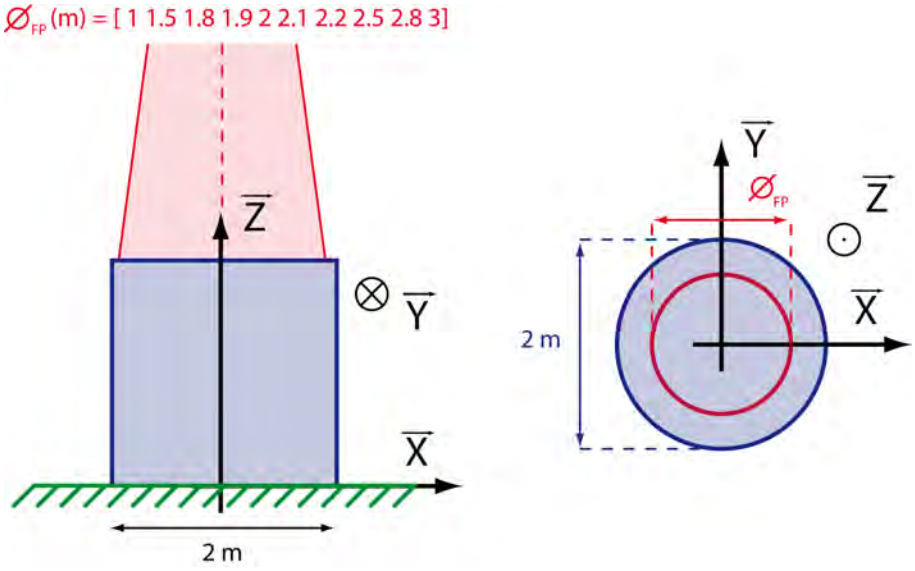
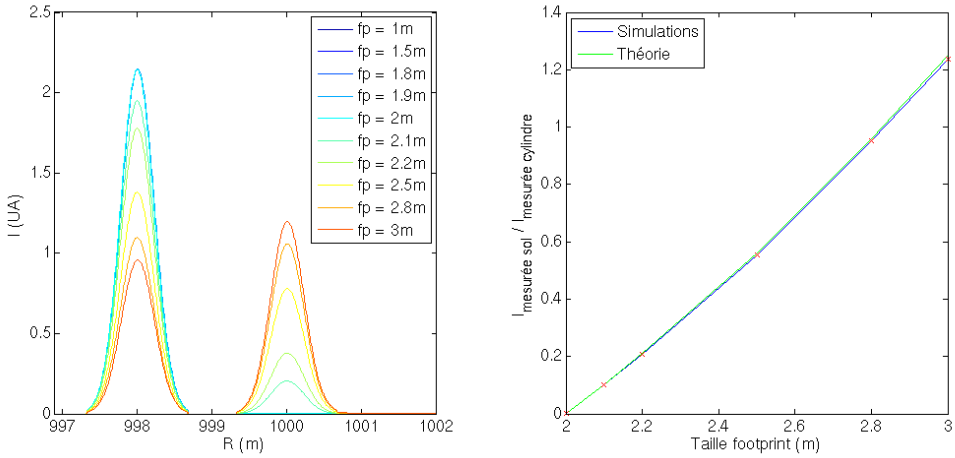


Figure 6.3 – *Scène de test numéro 2 : cylindre. Le diamètre $\varnothing_{FP}$ de l'empreinte au sol du lidar varie de $1m$ à $3m$.*



(a) (b)

Figure 6.4 – *Signaux lidar onde complète simulés (a) et intensités totales rétrodiffusées en fonction du diamètre fp de la tâche au sol du lidar (b)*

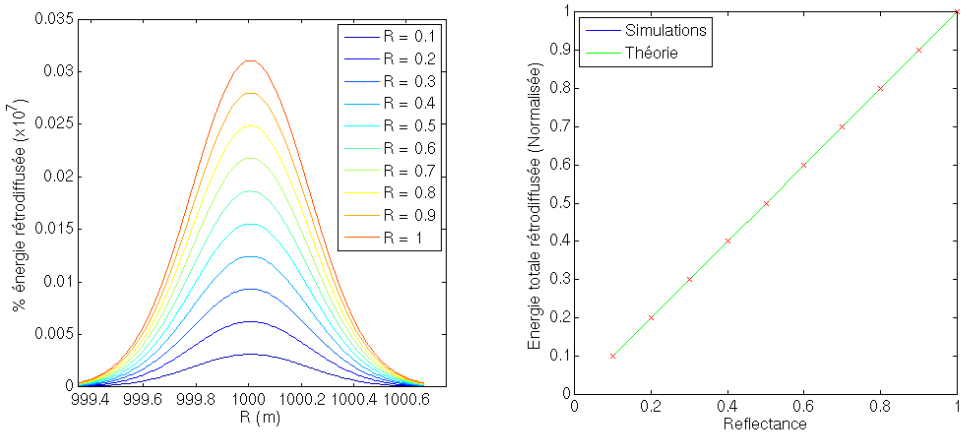
La figure 6.4(b) représente, pour les tailles de faisceau supérieures au diamètre du cylindre, le rapport entre les intensités mesurées rétrodiffusées par le sol et par le cylindre. Les surfaces étant Lambertiennes, et l'intensité lumineuse à l'intérieur du faisceau laser étant uniforme, ce rapport peut s'exprimer en fonction des diamètres $\varnothing$ du faisceau et du cylindre comme :

$$\frac{I_{sol}}{I_{cylindre}} = \frac{S_{sol}}{S_{cylindre}} = \frac{\varnothing^2_{faisceau} - \varnothing^2_{cylindre}}{\varnothing^2_{cylindre}} = \frac{\varnothing^2_{faisceau}}{\varnothing^2_{cylindre}} - 1 \tag{6.2.1}$$

C'est à cette loi théorique que sont comparées les valeurs simulées sur la figure 6.4(b).

6.2.3 Test 3 : Réflectance lambertienne

Le troisième test de la série consiste à simuler un plan Lambertien observé en incidence normale, avec une taille de faisceau constante ($\varnothing_{faisceau} = 0.5m$) en faisant varier la réflectance du plan. On s'assurera de cette manière de la simulation correcte de l'intensité rétrodiffusée ainsi que de la bonne prise en compte du paramètre de réflectance des surfaces Lambertiennes.



(a) (b)

Figure 6.5 – *Signaux lidar onde complète simulés (a) et intensités totales rétrodiffusées (b) en fonction de la réflectance Lambertienne R du plan.*

La figure 6.5 montre bien à quel point la prise en compte de la loi de réflectance Lambertienne est précise dans les simulations. Cette figure ne valide cependant que la variation linéaire de l'intensité rétrodiffusée en fonction de la réflectance Lambertienne, et il faudra comparer quantitativement les signaux pour valider plus complètement la simulation.

6.2.4 Test 4 : Plan incliné

Une fois le comportement de la réflectance Lambertienne testé, nous pouvons nous intéresser au facteur géométrique intervenant dans la loi de diffusion Lambertienne. Pour cela, on simule l'observation d'un plan de réflectance Lambertienne $R = 1$ dont on fait varier l'inclinaison (ce qui équivaut à l'observer à incidence variable).

On s'attend ici à observer des signaux lidar d'amplitude décroissante et d'élargissement croissant à mesure que l'inclinaison du plan augmente. Grâce à cette scène, on vérifie, non seulement que l'intensité totale rétrodiffusée suit la loi théorique, mais également que l'élargissement de la réponse lidar est correct. Toutes les simulations sont réalisées avec une taille de faisceau $\varnothing_{faisceau} = 0.5m$.

La figure 6.7 montre les signaux simulés ainsi que les intensités totales rétrodiffusées. On peut vérifier que celles-ci suivent bien la loi théorique :

$$I_{totale}(\theta) \propto \cos\theta \tag{6.2.2}$$

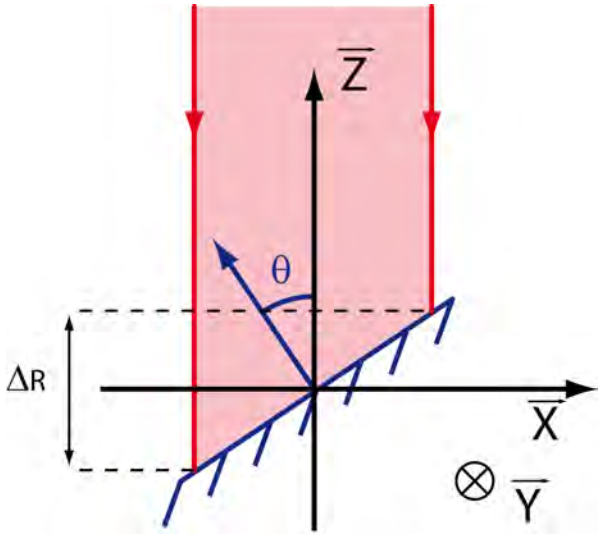
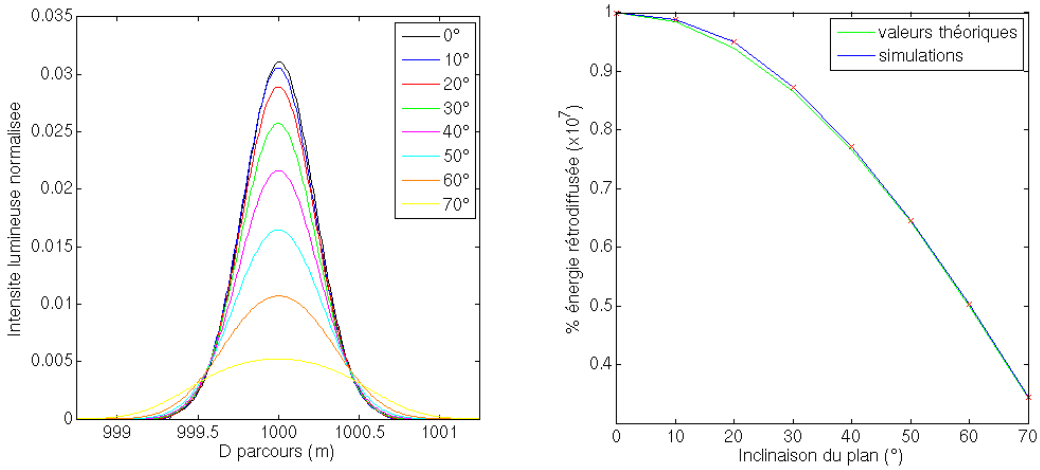


Figure 6.6 – *Scène simulée et illustration du calcul géométrique de l'élargissement.*



(a) (b)

Figure 6.7 – *Signaux lidar onde complète simulés (a) et intensités totales rétrodiffusées en fonction de l'inclinaison du plan Lambertien (b)*

Sur la figure 6.8 est représenté l'élargissement des signaux onde complète. La notion d'élargissement est ici définie comme la moitié de l'écart entre les distances minimales et maximales parcourues par les photons collectés par le lidar. L'élargissement s'exprime donc en mètres, et est directement lié à l'inclinaison du plan et à la taille du faisceau par la relation (illustrations sur la figure 6.6) :

$$e(\theta) = \varnothing_{faisceau} \tan\theta \tag{6.2.3}$$

C'est à cette loi théorique que sont comparées les valeurs simulées sur la figure 6.8.

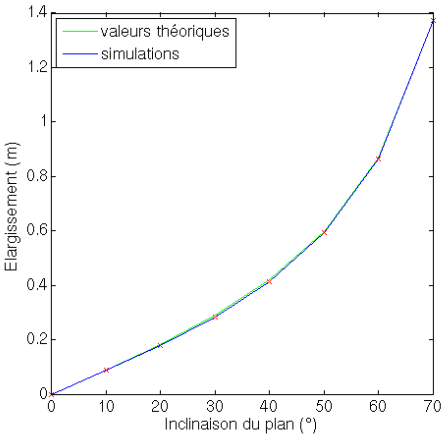


Figure 6.8 – *Elargissement de la réponse lidar en fonction de l'inclinaison du plan Lambertien.*

6.2.5 Test 5 : Surface semi-transparente

La prise en compte d'un matériel semi-transparent bi-Lambertien (réflexion et transmission Lambertiennes) est quasi-immédiate grâce aux fonctionnalités de LuxRender. Afin de tester la simulation du signal lidar avec de tels matériaux, nous avons conçu une scène simple constituée de deux plans parallèles espacés de $1m$, le premier étant semi-transparent, et le second opaque.

Deux séries de mesures ont été réalisées sur cette scène :

- Dans un premier temps nous faisons varier la réflectance $\mathcal{R}_1$ et la transmittance $\mathcal{T}_1$ du plan semi-transparent, en gardant toujours $\mathcal{R}_1 + \mathcal{T}_1 = 1$ et nous mesurons les intensités des diffusions provenant directement du premier plan (ordre 1) et provenant du second plan (ordre 3 : transmission - reflexion - transmission). La réflectance du second plan est fixée à $\mathcal{R}_2 = 0.5$.
- Nous fixerons $\mathcal{R}_1 = 0.5$ et $\mathcal{T}_1 = 0.5$ pour faire varier $\mathcal{R}_2$.

La figure 6.9 montre les signaux simulés lorsque les propriétés optiques du plan semi-transparent varient.

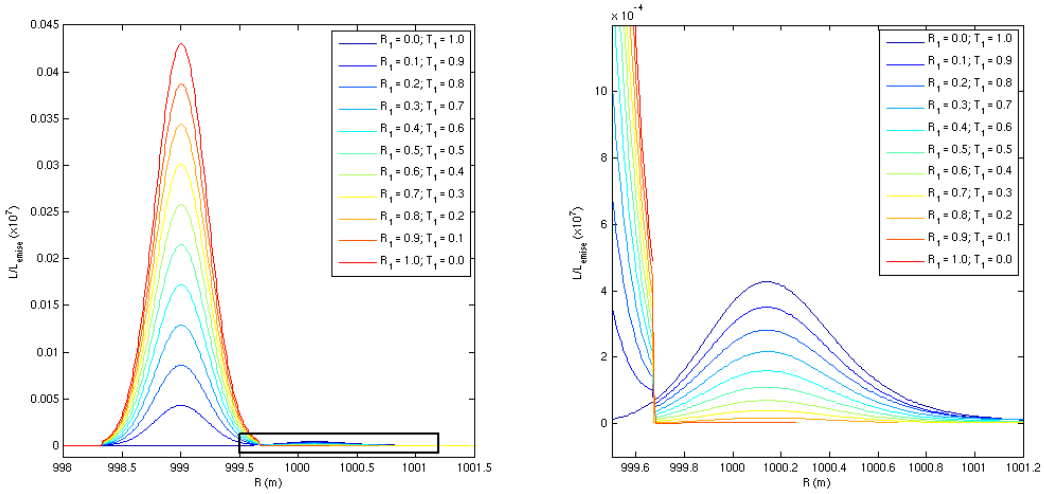
Nous avons ensuite voulu confronter les intensités renvoyées par le premier plan (ordre 1 : réflexion simple) et par le second plan (ordre 3 : transmission - réflexion - transmission) aux expressions théoriques simples calculables. L'intensité réfléchie par le premier plan suit ainsi une loi :

$$I_1 \propto \frac{\mathcal{R}_1}{\pi} \tag{6.2.4}$$

La loi pour l'intensité renvoyée par le second plan est un peu plus complexe. Il faut en effet tenir compte des facteurs angulaires apparaissant lors de la première transmission et de la réflexion. On obtient une loi :

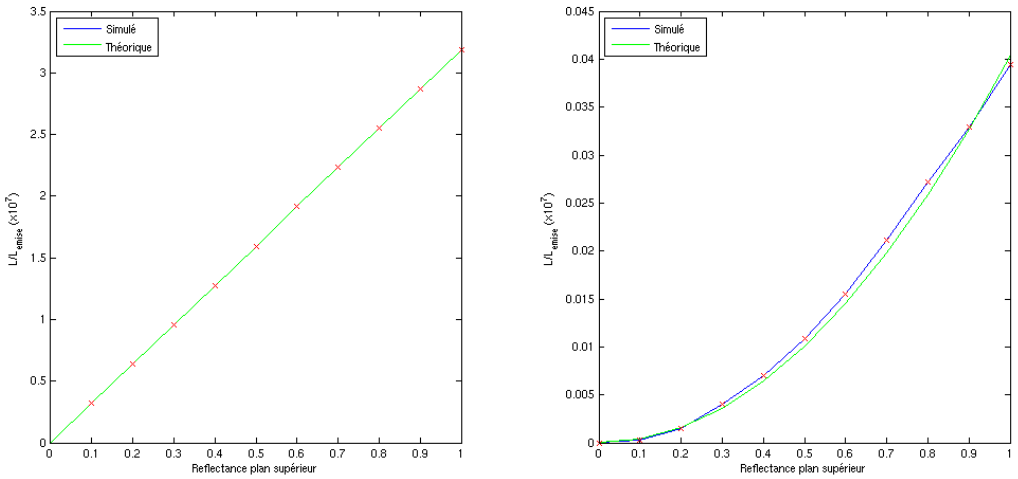
$$I_2 \propto \frac{\mathcal{T}_1 < \cos\theta >}{\pi} \frac{\mathcal{R}_2 < \cos\theta >}{\pi} \frac{\mathcal{T}_1}{\pi} = \frac{\mathcal{T}_1}{2\pi} \frac{\mathcal{R}_2}{2\pi} \frac{\mathcal{T}_1}{\pi} \tag{6.2.5}$$

Les comparaisons des intensités simulées avec ces lois théoriques sont présentées sur la figure 6.10.



(a) (b)

Figure 6.9 – *Signaux lidar onde complète simulés en fonction de la réflectance $\mathcal{R}_1$ et de la transmittance $\mathcal{T}_1$ du premier plan (a). Agrandissement de la partie encadrée (b)*



(a) (b)

Figure 6.10 – *Intensité réfléchie par un premier plan semi-transparent (a) et par un second plan (b) comparées aux expressions théoriques.*

Nous avons ensuite vérifié le comportement de la scène lorsque la réflectance du second plan varie. Les intensités réfléchies à l'ordre 3 par ce dernier sont comparées dans la figure 6.11 à la loi théorique de l'équation 6.2.5 dans laquelle on a fixé $\mathcal{R}_1 = 0.5$ et $\mathcal{T}_1 = 0.5$.

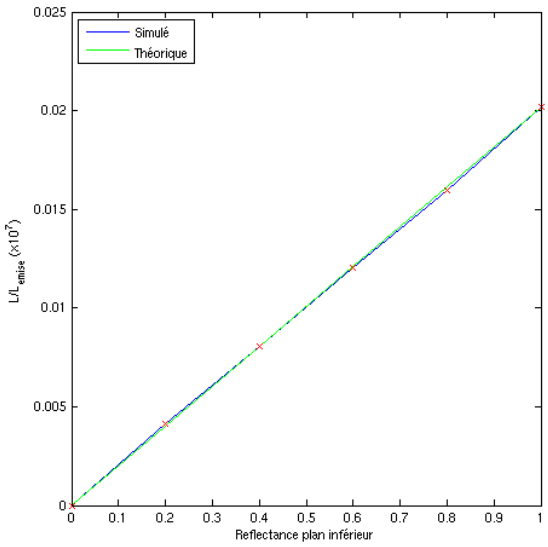


Figure 6.11 – *Intensité réfléchie par le second plan en fonction de sa réflectance*

6.3 Tests de validation sur végétation uniforme idéale

Supposant une couche de végétation homogène dont les feuilles suivent une loi de LAD bien précise, il est possible de calculer, sous quelques hypothèses, la forme du signal lidar onde complète mesuré en visée nadir. Dans cette section, après avoir établi cette expression, nous comparons le résultat des calculs avec les simulations DELiS.

6.3.1 Expression théorique du signal lidar onde complète

Etant donné une couche de végétation homogène décrite par son LAI, son LAD et son épaisseur H, la fraction de rayonnement intercepté par une tranche d'épaisseur infinitésimale dR de végétation s'écrit comme le rapport entre la surface totale apparente des feuilles $S_{tot.,leaves,app.}$ situées dans l'empreinte laser et la surface totale $S_{tot.,footprint}$ de l'empreinte laser :

$$f_{intercepted} = \frac{S_{tot.,leaves,app.}}{S_{tot.,footprint}} = \alpha S_{leaf} \rho_l dR \tag{6.3.1}$$

où S_{leaf} est la surface d'une feuille, ρ_l la densité volumique de feuilles (m^{-3}) de la couche de végétation et $\alpha =< \cos\theta_l >_{LAD}$ la valeur moyenne prise par le cosinus des angles d'orientation des feuilles (dépendant du LAD). On suppose ici que l'épaisseur dR est suffisamment faible pour que le recouvrement des feuilles puisse être négligé. On peut alors écrire l'équation différentielle de propagation de la lumière dans le couvert végétal :

$$E(R + dR) = E(R)(1 - \alpha LAI \frac{dR}{H}) \qquad [\mathrm{W.\ m^{-2}}] \tag{6.3.2}$$

où l'on a utilisé la relation liant le LAI à la densité foliaire ρ_l et à l'épaisseur H de la couche de végétation :

$$LAI = H \rho_l S_{leaf} \tag{6.3.3}$$

L'équation 6.3.2 peut également se réécrire :

$$\frac{dE}{dR} = -\frac{\alpha LAI}{H} E(R) \tag{6.3.4}$$

ce qui est une équation différentielle classique dont la solution est l'expression de la loi de Beer-Lambert :

$$E(R) = E(R_0) e^{-\frac{\alpha LAI}{H}(R-R_0)} \qquad [\text{W. m}^{-2}] \tag{6.3.5}$$

où R_0 est la distance séparant le lidar du sommet de la couche de végétation.

Si l'on suppose que les diffusions d'ordre 1 sont prédominantes dans le signal lidar rétrodiffusé (ce que nous avons pu vérifier pour des simulations de signaux lidar à petite empreinte), la luminance réfléchie à la distance R par la couche de végétation est proportionnelle à l'éclairement restant à cette distance :

$$L_r(R) = L_r(R_0) e^{-\frac{\alpha LAI}{H}(R-R_0)} \qquad [\text{W. m}^{-2}\text{. sr}^{-1}] \tag{6.3.6}$$

$L_r(R_0)$ étant la luminance réfléchie par le sommet de la canopée. L'hypothèse de prédominance du premier ordre est indispensable pour parvenir à une expression analytique de la luminance rétrodiffusée. Elle assure que, dès lors qu'une fraction de l'éclairement incident est parvenue jusqu'à la distance R dans la couche de végétation, le trajet de retour jusqu'au lidar se fera sans interception. On calcule la luminance rétrodiffusée au sommet de la canopée en considérant qu'une feuille individuelle de surface S_{leaf} et d'inclinaison θ intercepte une fraction de l'éclairement incident :

$$E_{int,leaf} = \frac{S_{leaf}\cos\theta}{S_{tot.,footprint}} E(R_0) \qquad [\text{W. m}^{-2}] \tag{6.3.7}$$

Si l'on considère que les feuilles ont une réflectance Lambertienne r_{leaf}, chaque feuille de la première couche de végétation va rétrodiffuser une luminance :

$$L_{r,leaf} = \frac{r_{leaf}}{\pi} E_{int,leaf} = \frac{\rho_{leaf}}{\pi} \frac{S_{leaf}\cos\theta}{S_{tot.,footprint}} E(R_0) \qquad [\text{W. m}^{-2}\text{. sr}^{-1}] \tag{6.3.8}$$

La première couche d'épaisseur dR contient un nombre total de feuilles :

$$N_{leaves} = \rho_l S_{tot.,footprint} dR = LAI \frac{S_{tot.,footprint}}{S_{leaf}} \frac{dR}{H} \tag{6.3.9}$$

offrant chacune au lidar une section efficace $S_{leaf,eff} = S_{leaf}\cos\theta$. La valeur de $L_r(R_0)$ intégrée sur une couche d'épaisseur dR s'exprime donc finalement par :

$$L_r(R_0) = \beta LAI \frac{dR}{H} \frac{r_{leaf}}{\pi} E(R_0) \qquad [\text{W. m}^{-2}\text{. sr}^{-1}] \tag{6.3.10}$$

avec $\beta =< \cos^2\theta >_{LAD}$.

Ceci étant calculé, on peut écrire l'expression de la réponse impulsionnelle du lidar onde complète d'une couche de végétation homogène :

$$\frac{L_r(R)}{I_{e,tot}} = \frac{1}{R^2} \beta LAI \frac{dR}{H} \frac{r_{leaf}}{\pi} e^{-\frac{\alpha LAI}{H}(R-R_0)} \chi_{[R_0;R_0+\Theta]}(R) \qquad [\text{W. m}^{-2}\text{. sr}^{-1}] \tag{6.3.11}$$

où $\chi_{[R_0;R_0+\Theta]}(R)$ est la fonction indicatrice de l'intervalle $[R_R; R_0 + \Theta]$ de sorte que $\chi_{[R_0;R_0+\Theta]}(R) = 1$ si $R \in [R_0; R_0 + \Theta]$ et $\chi_{[R_0;R_0+\Theta]}(R) = 0$ si $R \notin [R_0; R_0 + \Theta]$.

La forme finale du signal lidar onde complète est alors obtenue par convolution de la réponse impulsionnelle par l'impulsion laser émise.

6.3.2 Simulations DELiS et comparaison

Pour comparer les simulations effectuées avec DELiS à l'expression analytique exprimée précédemment, nous avons modélisé plusieurs couches de végétation homogène de $LAI = 2$ et $LAI = 4$ avec un LAD sphérique ou uniforme. Chacune des couches de végétation uniforme a une épaisseur de $3m$ et est composée de feuilles de forme triangulaire de surface individuelle $S_{leaf} = 16cm^2$.

Comme nous l'avons vu précédemment, le modèle DELiS procède à la simulation du signal lidar onde complète par estimation de la réponse impulsionnelle de la scène puis par convolution par l'impulsion laser émise. Afin de simplifier les comparaisons, nous présenterons donc ici directement les réponses impulsionnelles simulées et théoriques. Ces résultats sont présentés sur la figure 6.12.

Afin que les comparaisons ne soient pas biaisées par l'impact des diffusions multiples que nous avons été contraints de négliger pour établir l'expression du signal théorique, les simulations DELiS qui sont présentées par la suite ont été réalisées en prenant en compte uniquement les retours directs.

Sur la figure 6.12, on constate visuellement un très bon accord entre simulation et expression théorique. Afin de quantifier cet accord, nous avons calculé les coefficients de corrélation r^2 ainsi que les écarts quadratiques moyens (exprimés comme une fraction de la valeur moyenne) pour chaque comparaison. Ces résultats figurent dans la table 6.1 pour chaque couple (LAI, LAD). Ces résultats confirment l'impression visuelle de très bon accord puisque les coefficients de corrélation sont supérieurs à 0.98 dans les quatre cas.

Table 6.1 – *Corrélation et écart quadratique moyen relatif pour les comparaisons entre la simulation DELiS et le signal théorique sur une couche de végétation uniforme idéale.*

	LAI = 2	LAI = 4
LAD Uniforme	r^2 = 0,99	r^2 =1,00
	RMSE = 4,1%	RMSE = 4,1%
LAD Sphérique	r^2 = 0,98	r^2 = 1,00
	RMSE = 5,8%	RMSE = 4,4%

Simultanément, il est possible d'approcher la réponse impulsionnelle simulée avec DELiS par une loi exponentielle décroissante telle qu'exprimée dans l'équation 6.3.12 et de comparer les coefficients A et B de cette exponentielle aux valeurs théoriques. Cette comparaison est réalisée dans la table 6.2 et montre une fois de plus un très bon accord.

$$\frac{L_r(R)}{I_{e,tot}} = Ae^{-B(R-R_0)} \tag{6.3.12}$$

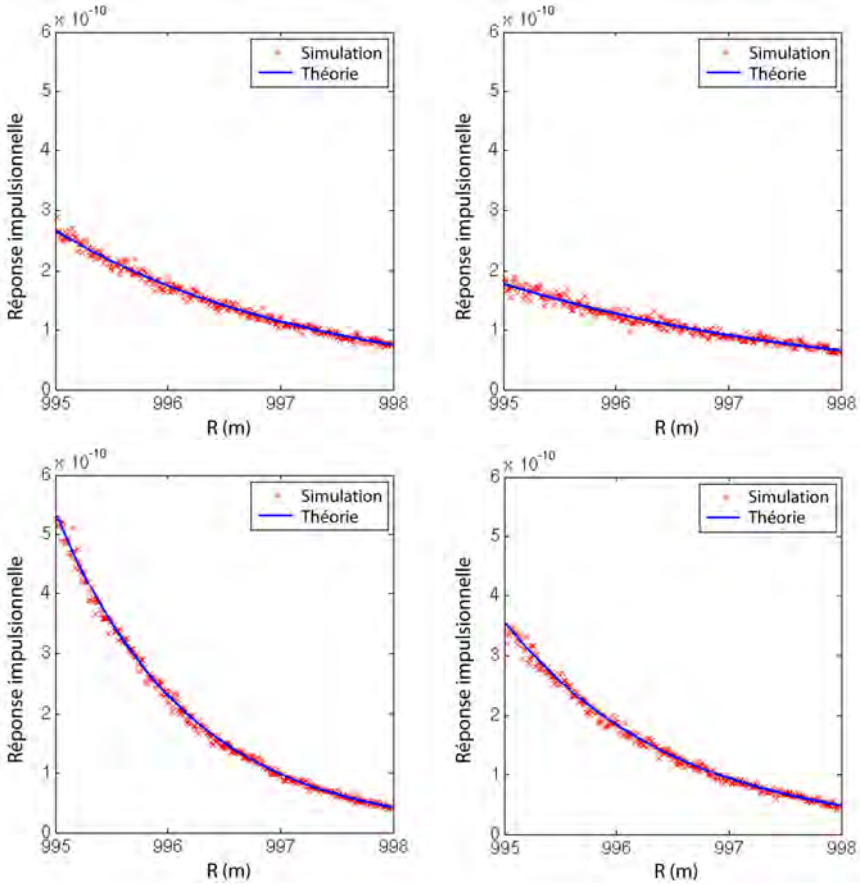


Figure 6.12 – *Réponse impulsionnelle d'une couche de végétation homogène. Simulations DELiS (croix rouges) comparées à la réponse théorique (courbe en bleu) pour $LAI = 2$ (en haut), $LAI = 4$ (en bas) et avec un LAD uniforme (à gauche) et sphérique (à droite).*

Des tests identiques ont été réalisés avec les quatre autres lois pour le LAD (érectophile, planophile, plagiophile et extrêmophile). On obtient pour ces lois de LAD des accords similaires tant en termes de corrélation que d'écart quadratique moyen ou de coefficients de l'exponentielle.

Table 6.2 – *Paramètres des lois exponentielles estimés sur les simulations de DELiS et valeurs théoriques.*

		LAI = 2		LAI = 4	
		A (x10¹⁰)	B	A (x10¹⁰)	B
LAD Uniforme	Théorie	2,65	0,21	5,30	0,42
	DELiS	2,67	0,22	5,25	0,42
LAD Sphérique	Théorie	1,77	0,17	3,54	0,33
	DELiS	1,78	0,17	3,51	0,33

6.4 Vers la validation par comparaison à un système réel

Afin de valider le modèle DELiS par comparaison à des données réelles, nous avons conçu et fait réaliser un ensemble de mires dans le cadre de la plateforme LIMA [1]. L'observation de ces mires avec un scanner laser onde complète devrait permettre de valider d'une part le modèle d'instrument mis en place pour DELiS, et d'autre part le modèle de calcul de la réponse impulsionnelle. Nous avons à cette fin utilisé le scanner laser onde complète Riegl VZ-1000, également acquis dans le cadre de la plateforme LIMA.

Dans cette section, nous présentons le travail de conception et de préparation qui a été réalisé pendant la thèse pour permettre d'arriver à la validation du modèle DELiS par comparaison à des données réelles.

Une campagne de mesures préliminaires a été réalisée le 25 juillet 2013. Nous montrerons ici les résultats obtenus et en tirerons des enseignements pour une future campagne de validation du modèle.

6.4.1 Présentation du matériel et du plan d'essais

Le scanner laser Riegl VZ-1000

Le scanner laser terrestre Riegl VZ-1000 a déjà été mentionné dans le chapitre 1. Il présente la particularité de permettre l'enregistrement des signaux retour en mode onde complète, une fonctionnalité qui n'est pas encore très répandue pour les scanners lasers terrestres. Nous allons donc pouvoir l'utiliser dans le but de comparer les résultats du modèle DELiS à des données réelles.

Figure 6.13 – *Le scanner laser terrestre Riegl VZ-1000 de l'ONERA lors de la campagne de mesures du 25 juillet 2013.*

Le VZ-1000 est capable de produire des scans à des distances de plusieurs centaines de mètres, jusqu'à 1400m d'après le fabricant [2] (pour une cible de réflectance 0.9 et dans des conditions de visibilité atmosphérique idéales, voir figure 6.14). Pour cela, il dispose de quatre modes de fonctionnement opérants à différentes fréquences de répétition du laser. Le fonctionnement précis de ces quatre modes n'est pas très clair. Il est possible que le laser soit utilisé à une fréquence plus faible de sorte à produire des impulsions plus énergétiques et donc

1. La réalisaiton des mires a été financée par l'ONERA, la Région Midi-Pyrénées, la Préfecture de Haute-Garonne et Midi-Pyrénées, l'Union Européenne et la communauté d'agglomération du Grand Toulouse.

2. A cette distance, il n'est néanmoins pas certain que la fonctionnalité onde complète soit toujours disponible.

à pouvoir observer à des distances supérieures, mais il se peut également que l'instrument ait recours à plusieurs impulsions laser pour enregistrer un seul signal lidar. La figure 6.14 et la table 6.3 reprennent plus en détail les informations techniques disponibles pour le VZ-1000 (*Riegl*).

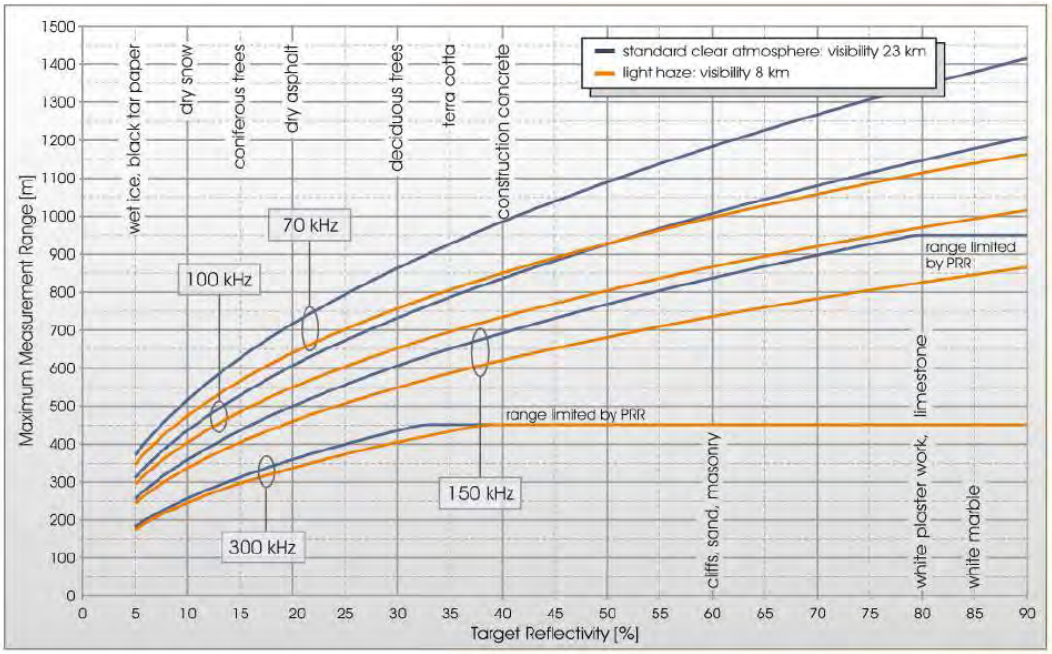


Figure 6.14 – *Performances du Riegl VZ-1000 : distance maximale possible en fonction de la réflectance de la cible pour différentes visibilités atmosphériques et chaque mode utilisé. Source : site Web Riegl (Riegl)*

Table 6.3 – *Caractéristiques techniques du Riegl VZ-1000 dans chacun de ses modes de fonctionnement. Source : site Web Riegl (Riegl)*

Range Performance [1]

Laser PRR (Peak) [2]	70 kHz	100 kHz	150 kHz	300 kHz
Effective Measurement Rate [4]	29 000 meas./sec.	42 000 meas./sec.	62 000 meas./sec.	122 000 meas./sec.
Max. Measurement Range [1]				
for natural targets ρ ≥ 90%	1400 m	1200 m	950 m [4]	450 m [4]
for natural targets ρ ≥ 20%	700 m	600 m	500 m	350 m
Max. Number of Targets per Pulse	practically unlimited [3]			
Accuracy [6] [8]	8 mm			
Precision [7] [8]	5 mm			

Minimum Range	2,5 m
Laser Wavelength	near infrared
Beam Divergence [9]	0.3 mrad

1) with online waveform processing
2) rounded values, selectable by measurement program
3) Typical values for average conditions. Maximum range is specified for flat targets with size in excess of the laser beam diameter, perpendicular angle of incidence, and for atmospheric visibility of 23 km. In bright sunlight, the max. range is shorter than under an overcast sky.
4) limited by PRR
5) details on request
6) Accuracy is the degree of conformity of a measured quantity to its actual (true) value.
7) Precision, also called reproducibility or repeatability, is the degree to which further measurements show the same result.
8) One sigma @ 100 m range under *RIEGL* test conditions.
9) Measured at the 1/e² points. 0.3 mrad corresponds to an increase of 30 mm of beam diameter per 100 m distance.

Cibles dédiées à l'observation avec le lidar onde complète

Une des principales difficultés de la validation d'un modèle de lidar onde complète par comparaison à des mesures réelles réside dans la modélisation précise de la scène observée. Si la scène observée est complexe, comme dans le cas d'une scène de végétation, il est quasiment impossible de disposer d'un modèle 3D représentant sa géométrie de façon suffisamment précise pour permettre la comparaison des signaux réels aux signaux simulés. En effet, tout écart entre observation et simulation pourra être imputé à l'imprécision de la représentation de la scène. D'autre part, si la scène observée est trop simple, une cible plane par exemple, la comparaison à des données réelles n'apporte pas de validation supplémentaire par rapport aux confrontations analytiques réalisées précédemment.

Nous avons donc tenté de nous munir de cibles dont la géométrie pourra être suffisamment complexe pour que le signal lidar ne soit pas calculable aisément par des moyens analytiques, mais à la fois parfaitement maîtrisée de sorte que l'on dispose d'un modèle 3D parfaitement représentatif.

Dans ce but, nous avons conçu et fait réaliser par la société CSTM (Conception de Systèmes et Technologie Mécanique) une série de mires dédiées à l'observation par un lidar onde complète. Ces mires, visibles sur les figures 6.15 et 6.16, sont des structures modulaires cubiques en aluminium de 1m de coté. Elles ont été conçues de sorte à pouvoir s'assembler les unes aux autres pour réaliser des cibles de géométries variées. Sur toutes les faces des structures cubiques, il est possible de fixer un panneau rigide également en aluminium.

Figure 6.15 – *Assemblage des mires pour la réalisation des essais du 25 juillet 2013.*

Les panneaux mesurent 1m de coté et sont disponibles en quatre teintes mattes : blanc, gris clair, gris foncé et noir (figure 6.15, en bas).

Afin de tester la déformation du signal lidar onde complète lors de la traversée de milieux complexes, nous avons également conçu une série de panneaux partiellement évidés :

- Un panneau à demi évidé « bord de plage » (figure 6.15, en haut à gauche) permettra d'observer le comportement des signaux lidar lorsqu'une transition géométrique brusque apparait.
- Deux panneaux « à barres » (figure 6.15, en haut à droite) présentent une série de découpes en formes de barres de 3cm de largeur de sorte que la panneau est à 50% évidé. Ces panneaux permettront, en les plaçant devant des panneaux pleins, de produire des signaux à échos multiples.
- Quatre panneaux ont été pourvus de découpes triangulaires (figure 6.15, en haut au milieu gauche) afin de mimer l'aspect aléatoire d'un couvert végétal. Ces panneaux seront plutôt utilisés pour des acquisitions aéroportées ultérieures.
- Un panneau a été muni d'une découpe en forme d'éventail (figure 6.15, en haut au milieu droite) afin d'évaluer la résolution des instruments.

Enfin, il est possible de fixer un panneau à l'intérieur des cubes et de le placer à n'importe quelle position. Cette fonctionnalité va nous permettre de placer un panneau plein derrière un autre panneau partiellement évidé et de faire varier continument l'espacement des panneaux.

Figure 6.16 – *Mires 3D dédiées à l'observation avec le lidar onde complète. A gauche, assemblage de plusieurs cubes vu de l'intérieur. A droite, structure permettant la fixation d'un panneau intermédiaire.*

Essais envisagés

Pour la réalisation des essais, les mires seront placées dans la configuration illustrée sur la figure 6.15. Afin de limiter les effets de l'herbe au sol sur les panneaux évidés, ceux-ci seront sur-élevés par assemblage avec un autre cube, muni quant à lui d'un panneau plein. Quatre structures placées côte à côte permettront de disposer des quatre teintes pour les panneaux pleins, et des quatre types de découpes.

Dans un premier temps, les panneaux découpés seront observés seuls, sans aucun panneau derrière eux. On observera alors cet ensemble de mires depuis plusieurs distances. Ces essais permettront d'évaluer le comportement de la mesure de l'intensité du signal lidar lorsque la distance de mesure augmente, lorsque la réflectance des cibles varie, et lorsque les cibles sont partiellement évidées.

Le dispositif précédent permettra également de choisir une distance à laquelle on tentera de mettre en évidence la déformation des signaux lidar onde complète. Pour cela, on placera des panneaux pleins derrière la mire à barres et derrière la mire bord de plage. On fera ensuite varier l'écartement des panneaux évidés et des panneaux pleins de façon à passer d'une situation où les échos correspondant aux deux panneaux ne sont pas distincts à une situation où le scanner parvient à résoudre les deux plans consécutifs, ceci avec des étapes intermédiaires d'écartement qui devraient permettre d'observer un élargissement progressif des échos lidar.

6.4.2 Simulation prédictive des mesures avec DELiS

Modéliser le VZ-1000

Comme nous l'avons vu précédemment, le VZ-1000 possède quatre modes de fonctionnement permettant d'observer des distances différentes. Pour cette raison, nous avons développé quatre modèles différents d'instruments pour DELiS, selon les principes décrits en 4.4. Puisque nous n'avons pas prévu de modéliser l'utilisation de plusieurs impulsions pour enregistrer un seul signal lidar, nous avons supposé que c'est l'énergie de l'impulsion laser qui varie dans chacun des modes. Même si cette hypothèse s'avère fausse, disposer d'une impulsion plus énergétique, ou accumuler les retours de plusieurs impulsions peut être considéré comme équivalent du point de vue de la génération de la forme du signal ainsi que du rapport signal à bruit final. Les paramètres des modèles d'instruments utilisés pour le VZ-1000 dans DELiS sont donnés dans la table 6.4.

Modèle 3D de la scène

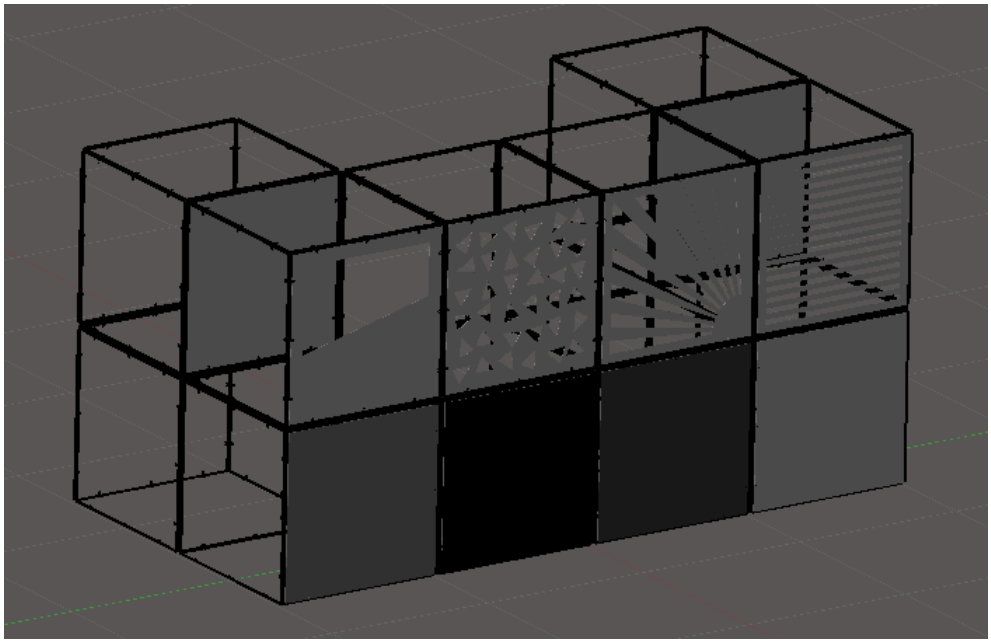


Figure 6.17 – *Modèle 3D des mires suivant la configuration des essais du 25 juillet 2013.*

Table 6.4 – *Paramètres instrumentaux utilisés pour modéliser le VZ-1000 avec DELiS. Sources : Riegl, Rocadenbosch Burillo (1996) et Richmond et Cain (2010). Quatre valeurs de l'énergie d'impulsion correspondent aux quatre modes de fonctionnement du scanner laser. En vert, paramètres dont la valeur précise est donnée par le fabricant. En rouge, paramètres ajustés pour reproduire les performances annoncées par le fabricant. Des valeurs typiques ont été utilisées pour les autres paramètres (voir section 4.4).*

Paramètre	**Unité**	**Valeur**
longueur d'onde	nm	1557
ifov illumination	mrad	0.3
durée impulsion (à 1%)	ns	9
énergie impulsion	mJ	0.03 / 0.02 / 0.015 / 0.007
ifov observation	mrad	0.4
diamètre récepteur	m	0.1
efficacité quantique		0.7
Gain APD		10
$F_{ex,APD}$		5.52
NEP APD	$pA.Hz^{-\frac{1}{2}}$	0.4
Gain transimpedance	$k\Omega$	4
NEP transimpedance	$nV.Hz^{-\frac{1}{2}}$	28
G ampli		18
NEP ampli	$nV.Hz^{-\frac{1}{2}}$	7
f_{sample}	GHz	0.5
U_{min} CAN	V	0
U_{max} CAN	V	12
n_{bits} CAN		10

Les modèles géométriques 3D des mires nous ont été fournies par la société CSTM chargée de leur réalisation. Nous disposons donc de modèles fidèles de la géométrie des cibles (voir figure 6.16). Nous avons supposé que toutes les surfaces possèdent des réflectances Lambertiennes dont les valeurs ont été mesurées sur les cibles réelles et sont données dans la table 6.5.

Table 6.5 – *Réflectances Lambertiennes des panneaux mesurées à* $\lambda = 1557$nm.

Teinte du panneau	Blanc	Gris clair	Gris foncé	Noir
Reflectance Lambertienne à 1557nm	0.85	0.19	0.09	0.05

Données simulées

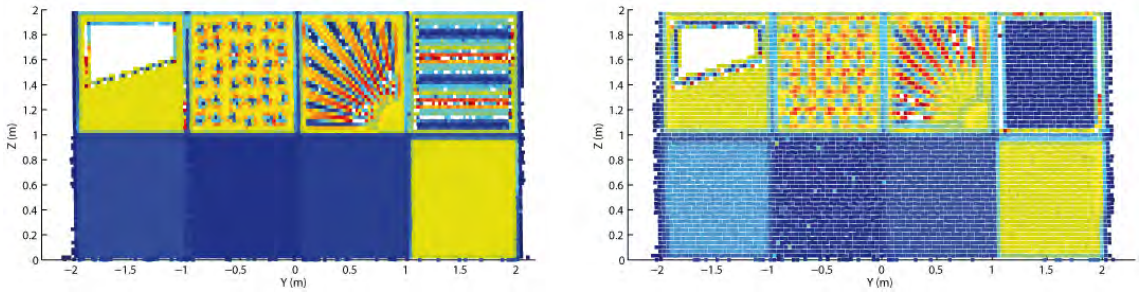


Figure 6.18 – *Nuages de points simulés sur le modèle 3D des mires depuis une distance de* 200m *(à gauche), et depuis une distance de* 400m *(à droite).*

La figure 6.18 montre un nuage de points 3D issu d'un jeu de données simulé avec le modèle DELiS sur les modèles 3D des mires. Les nuages de points ont été extraits à partir des signaux lidar grâce à la méthode décrite dans le chapitre 7. Ils sont colorés en fonction de l'amplitude des échos lidar. On constate que les motifs des panneaux à triangles et en éventail sont bien visibles à une distance de 200m mais moins bien à 400m. En effet, la dimension de l'empreinte laser sur les panneaux passe de 6cm à 12cm de diamètre. Sur la mire à barre, la fréquence spatiale observée est différente de celles des barres réelles, cet effet est dû au sous-échantillonnage spatial du scanner laser barre rapport à la fréquence des barres de la mire. Avec un échantillonnage plus fin selon la direction verticale, il devrait être possible de distinguer le motif des barres, malgré une dimension de la tâche laser (12cm) supérieure à celle des barres (3cm). En effet, l'essentiel de l'énergie laser est concentrée au centre de la tâche laser Gaussienne, ce qui permet de résoudre des détails inférieurs à la dimension de celle-ci.

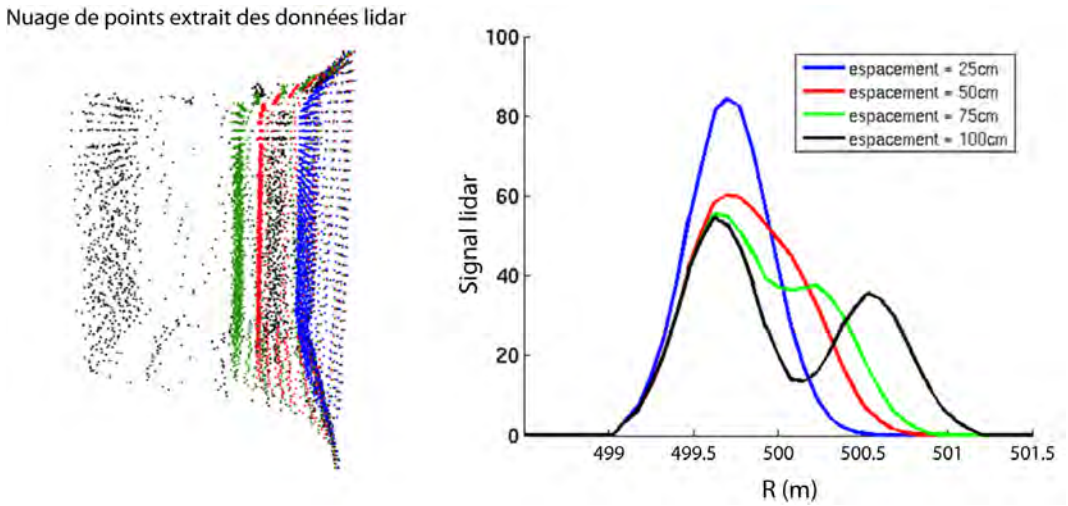


Figure 6.19 – *Simulation de l'observation de la mire à barres avec le VZ-1000 depuis une distance de* 500m*. Écartement progressif des panneaux. A gauche, visualisation sous forme d'un nuage de points 3D issu des signaux lidar. A droite, visualisation de signaux lidar pour les différents écartements des panneaux.*

Nous avons ensuite simulé l'observation de la mire à barres depuis une distance de 500m et placé un panneau plein derrière le panneau découpé. Nous observons alors l'impact de l'écartement des deux panneaux sur le nuage de points 3D obtenu, et sur la forme des signaux lidar onde complète.

Ces résultats sont présentés sur la figure 6.19 pour quatre espacements des panneaux (25cm, 50cm, 75cm et 100cm). On y voit, à gauche, l'écartement progressif des panneaux sur le nuage de points, et le passage d'une situation ou les deux panneaux ne sont pas du tout séparés par le lidar (espacement de 25cm, en bleu), à une situation où ils sont parfaitement séparés (espacement de 100cm, en noir). Les signaux lidar onde complète obtenus pour chacun des espacements de panneaux sont présentés à droite. On y observe que les situations intermédiaires (espacement de 50cm, en rouge et 75cm en vert) permettent d'observer des échos lidar déformés.

Enfin, on réalise le même type de manipulation avec la mire « bord de plage ». La figure 6.20 montre l'écartement progressif des panneaux sous forme de nuages de points obtenus pour chaque espacement des panneaux. On y observe la mesure de la position du panneau arrière, ainsi que quelques points localisés à la transition et qui occupent une position intermédiaire aux deux panneaux. Ces points sont le résultats d'une erreur de localisation induite par la déformation du signal onde complète.

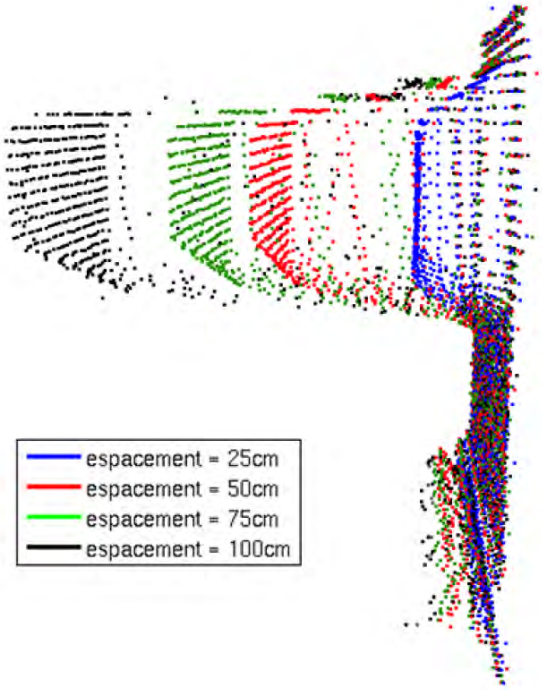


Figure 6.20 – *Simulation de l'observation de la mire « bord de plage » avec le VZ-1000 depuis une distance de* 500m. *Visualisation sous forme de nuage de points colorés suivant l'espacement des panneaux.*

Sur la figure 6.21, nous avons isolé, pour la situation où l'écartement est minimal (25cm), les signaux lidar onde complète correspondant à une ligne verticale de scan sur la transition entre le panneau frontal et le panneau arrière. Cette opération permet d'observer le passage d'un signal possédant un écho provenant du premier panneau (signaux en vert) à un signal

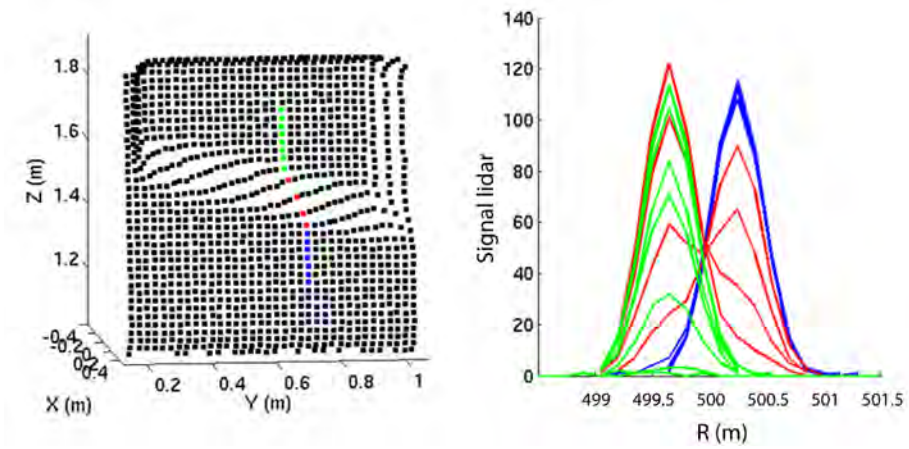


Figure 6.21 – *Simulation de l'observation de la mire « bord de plage » avec le VZ-1000 depuis une distance de* 500m *avec un écartement des panneaux de* 25cm*, visualisation des signaux successifs d'une ligne de visée verticale (à droite) et des points concernés sur le nuage de point global (à gauche).*

comportant un écho provenant du second panneau (signaux en bleu), en passant par des positions intermédiaires pour lesquelles l'écho lidar est déformé (signaux en rouge).

6.4.3 Mesures terrain et analyses préliminaires

Données acquises avec le VZ-1000

Lors de l'acquisition, le VZ-1000 permet d'enregistrer deux types d'informations. D'une part un nuage de points 3D, donc une information de type « retours discrets » et d'autre part l'enregistrement sous forme d'onde complète.

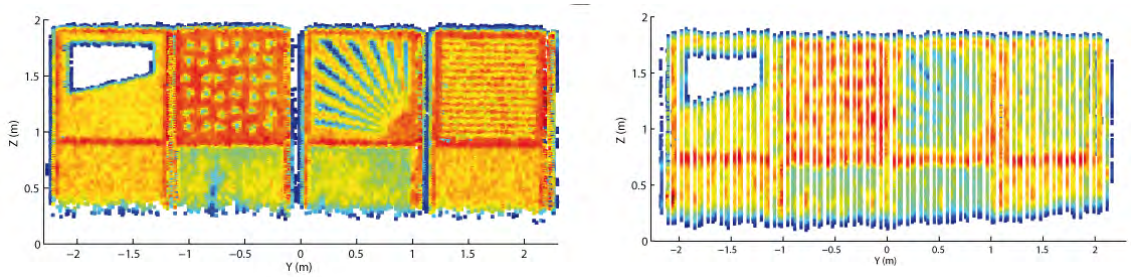


Figure 6.22 – *Nuages de points enregistrés par le VZ-1000 lors de l'observation des mires depuis une distance de* 200m *(à gauche), et depuis une distance de* 400m *(à droite).*

La figure 6.22 montre les nuages de points enregistrés par le VZ-1000 lors de l'observation des mires depuis une distance de 200m, puis de 400m. Sur cette figure, on observe plusieurs phénomènes. Tout d'abord, le bas des panneaux est manquant en raison de la présence d'herbes hautes sur le terrain. De la même façon que pour les données simulées, on constate que les motifs des panneaux découpés sont visibles à une distance de 200m mais pas à une distance de 400m. La comparaison de ces données avec les nuages de points simulés de la figure 6.18 montre que les amplitudes des échos lidar obtenus sur les panneaux pleins ne semblent pas correspondre. Il est possible que cet effet soit dû à une mauvaise connais-

sance de la BRDF des panneaux, qui pourrait comporter une composante spéculaire non négligeable. De plus, les données réelles sont d'une manière générale beaucoup plus bruitées, ceci est probablement dû d'une part à une notre mauvaise connaissance des caractéristiques techniques du capteur, et d'autre part aux turbulences atmosphériques au ras du sol.

Nous avons ensuite tenté d'exploiter l'enregistrement des données onde complète du VZ-1000. Nous nous sommes alors heurtés à deux limites importantes de l'instrument, que nous avons découvertes.

En premier lieu, et sans doute pour éviter de stocker une quantité trop importante de données, le scanner ne procède pas à l'enregistrement systématique du signal lidar onde complète. Il se contente d'enregistrer les signaux pour lesquels l'écho lidar est élargi. Le scanner considère alors que l'information « onde complète » apporte une information supplémentaire au nuage de points 3D enregistré. Dans tous les cas où le signal retour n'est pas suffisamment différent de l'impulsion laser émise, le VZ-1000 n'enregistre donc aucun signal onde complète, mais seulement une information de type « retour discret » qui permet d'obtenir un nuage de points 3D. A titre d'illustration, nous présentons sur la figure 6.23 un nuage de points extrait des données onde complète enregistrées par le VZ-1000 lors d'une acquisition sur les mires à une distance de 400m. On constate que les seuls signaux onde complète enregistrés le sont sur les parties des mires qui créent des déformations importantes : les bords des panneaux. Il s'agit justement là des parties des mires qui nous intéressent le moins.

Il apparait de plus impossible de comparer les données simulées dans les configurations présentées précédemment à des données acquises avec le VZ-1000. En effet, seuls les signaux déformés étant enregistrés par l'instrument, il est impossible d'observer une transition entre un écho non déformé et un écho déformé.

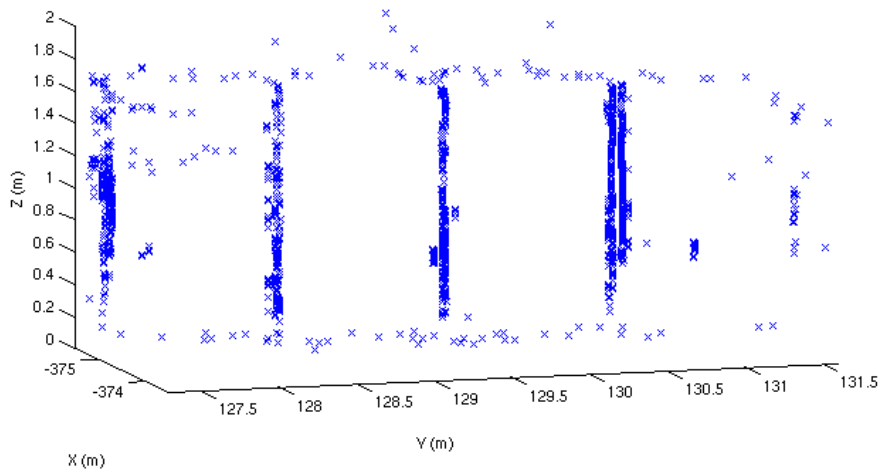


Figure 6.23 – *Nuage de points 3D issus par nos soins des données onde complète du VZ-1000 à une distance de* 400m *(vue de face comme sur la figure 6.22). Les résultats sont identiques pour une distance de* 200m.

Nous avons alors envisagé de comparer le nuage de points 3D enregistré par le VZ-1000 avec les nuages de points 3D issus des données lidar onde complète simulées. Une autre limite

du système et de la connaissance qu'il nous est possible d'en avoir apparait alors.

Dans notre effort de reproduire l'enregistrement du signal lidar onde complète du VZ-1000, nous avons muni notre modèle de toutes ses caractéristiques, en particulier de la fréquence d'échantillonnage de 500MHz du signal délivré en sortie d'instrument. Cependant, il apparaît clairement qu'une telle fréquence a été fixée une fois encore dans le but de stocker une moins grande quantité de données lors de l'enregistrement des signaux retour. En effet, l'impulsion laser émise, dont la durée est estimée à 9ns tout au plus, ne serait alors échantillonnée que par 4 points, ce qui parait insuffisant pour l'estimation précise de la position d'un point 3D.

Il nous sera possible de simuler par la suite un scanner laser équivalent au VZ-1000 mais possédant une fréquence d'échantillonnage temporelle supérieure (1GHz par exemple), mais cela ne résoudra en aucun cas le problème de la méthode d'estimation du nuage de points acquis par l'instrument, méthode qu'il nous est impossible de reproduire à partir des données lidar onde complète, à moins de disposer d'informations supplémentaires sur le fonctionnement interne de l'instrument.

6.4.4 Conclusion, points à travailler

Au cours de la thèse, nous avons commencé une démarche de validation expérimentale du modèle DELiS par comparaison à des données expérimentales. Pour cela, nous avons défini un modèle de capteur reproduisant les caractéristiques du scanner laser terrestre Riegl VZ-1000, instrument acquis par l'ONERA au cours de l'année 2013.

Nous avons imaginé un plan de validation grâce à la réalisation de mires dédiées qui permettent de générer des géométries à la fois complexes, afin de générer des signaux lidar onde complète déformés, et maitrisées, de façon à pouvoir les modéliser parfaitement avec DELiS.

Ces mires dédiées à l'observation par un lidar onde complète ont alors été conçues et nous en avons supervisé la réalisation.

Nous avons procédé à une série de mesures préliminaires qui ont permis de mettre en avant de nombreux points qui seront à considérer pour aboutir à la validation expérimentale du modèle DELiS :

- Les amplitudes des échos lidar obtenus sur les panneaux pleins ne sont pas similaires. Il faudra mieux caractériser la BRDF des panneaux, en tenant compte d'une éventuelle composante spéculaire.
- Les données simulées sont beaucoup moins bruitées que les données réelles. Il conviendra de mieux caractériser l'instrument afin de pouvoir modéliser les bruits de mesure plus précisément.
- Il semble que la turbulence atmosphérique impacte également les mesures. Sa prise en compte dans le modèle DELiS n'étant pas immédiate, on pourra essayer de réaliser les mesures dans des conditions de turbulence faible.
- Le VZ-1000 permet d'enregistrer la forme d'onde complète uniquement pour les retours lidar présentant un élargissement significatif par rapport à l'impulsion laser émise. D'une part, ceci nous a empêché de bien connaître la forme et la durée de l'impulsion laser émise. Il faudra tenter de la mesurer en laboratoire afin de pouvoir utiliser une forme d'impulsion réaliste avec DELiS. D'autre part, il nous a été impossible de comparer les données réelles avec nos simulations dans le cas de transitions d'un écho non élargi vers un écho lidar déformé.
- Enfin, une autre limite de l'appareil réside dans sa fréquence d'échantillonnage de l'onde complète. Une fréquence de 500MHz (contre 1GHz pour la plupart des instruments

aéroportés du commerce) donne lieu à des enregistrements de qualité très limitée, et complexifie grandement l'extraction de nuages de points 3D précis à partir des signaux.

Afin d'espérer produire une validation expérimentale de DELiS avec le VZ-1000, il faudra tout d'abord mieux caractériser le système en lui-même, pour mieux connaître les caractéristiques de son émission laser (durée et énergie de l'impulsion laser émise par exemple), et mieux comprendre le fonctionnement de son système de collection, d'amplification et de traitement interne du signal lidar reçu.

Étant conscients des limitations de l'appareil, il sera également possible de mettre au point des configurations d'observation des mires dans lesquelles les simulations du modèle DELiS pourront être comparées aux mesures réelles. Nous n'avons malheureusement pas disposé du temps nécessaire pour procéder à de nouvelles mesures dans le cadre de la thèse.

6.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé notre stratégie de validation du modèle DELiS en trois volets.

Dans un premier temps, une série de confrontations de simulations réalisées sur des cibles simples avec les résultats calculables analytiquement nous a permis de démontrer que le fonctionnement du modèle DELiS est conforme à plusieurs principes de bases tels que :

- Le calcul correct des distances parcourues par le signal lumineux.
- La bonne prise en compte de la dimension du faisceau laser émis.
- La restitution correcte de l'amplitude d'un signal lidar sur une cible idéale plane de réflectance Lambertienne dont la réflectance ou l'inclinaison varie.
- La gestion correcte de l'amplitude des échos lidar provenant d'un plan semi-transparent situé udevant un second plan opaque.
- La bonne modélisation de l'élargissement des échos lidar lors de l'observation d'un plan incliné.

Afin de pousser la démarche de vérification vers les scènes de végétation, qui sont au cœur de notre étude, nous avons ensuite comparé les résultats de simulations DELiS réalisées avec une couche de végétation plane homogène au résultat théorique calculé grâce à la loi de Beer-Lambert. Cet exercice nous a permis de montrer que le modèle DELiS est capable de prendre en compte des géométries complexes comme les feuillages et d'évaluer correctement la forme des échos lidar obtenus sur la végétation.

Enfin, nous avons engagé des travaux pour permettre la validation du modèle par comparaison avec des données réelles. Une série de mires dédiées à cette problématique a été conçue dans le cadre de la thèse, et nous en avons supervisé la réalisation. L'observation de ces cibles grâce au scanner laser terrestre Riegl VZ-1000 acquis par l'ONERA en 2013 a permis de mettre en avant une série de points durs sur lesquels il conviendra de travailler afin d'envisager par le futur la réalisation d'une campagne expérimentale de validation.

Deuxième partie

Reconstruction d'un MNT sous couvert végétal

Chapitre 7

Traitement des signaux lidar onde complète

Sommaire

7.1 Introduction 111
7.2 Prétraitement des données 112
7.2.1 Retrait de l'offset 112
7.2.2 Lissage des signaux 112
7.2.3 Etalonnage 112
7.3 Décomposition du signal lidar 112
7.3.1 Etat de l'art 113
7.3.2 Détection des échos 114
7.3.3 Un modèle d'écho asymétrique 117
7.4 Résultats, robustesse 119
7.4.1 Jeux de données 119
7.4.2 Choix du seuil pour la détection des échos 120
7.4.3 Evaluation de la qualité de la modélisation des échos 121
7.4.4 Distribution des paramètres de forme 122
7.5 Conclusion 124

7.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous proposons de mettre en place les traitements préliminaires qui nous permettront, dans les chapitres suivants, de parvenir à la classification des jeux de données lidar onde complète, puis à la reconstruction de la géométrie du terrain situé sous le couvert végétal.

Ce chapitre se concentre sur le traitement des données lidar brutes. Après une première étape de traitement préliminaire, les signaux lidar onde complètes sont séparés en une série d'échos lidar. Ces échos sont alors approchés par un modèle paramétrique décrivant leur forme. Ce sont les valeurs des paramètres extraites de cette démarche qui, associées aux positions 3D des points correspondants aux échos lidar, permettront d'exploiter les données onde complète vers la reconstruction d'un modèle numérique de terrain sous couvert végétal.

7.2 Prétraitement des données

La première étape de traitement des données lidar onde complète consiste à préparer les signaux afin de pouvoir par la suite en extraire un maximum d'informations. On procède généralement à plusieurs opérations préliminaires :

7.2.1 Retrait de l'offset

Certains instruments n'utilisent pas les premiers bits disponibles pour le codage des signaux, ce qui induit un biais artificiel dépendant des caractéristiques du convertisseur analogique-numérique. Afin de supprimer cet effet, nous commencerons par ramener tous les signaux à un niveau équivalent en leur retirant leur valeur minimale.

$$\tilde{S}(R) = S(R) - min(S(R)) \tag{7.2.1}$$

Cette opération permet également d'annuler un possible bruit de fond dû à un courant d'obscurité ou à un éclairement solaire trop important.

7.2.2 Lissage des signaux

S'il n'est pas effectué directement par le système, un lissage des signaux par convolution avec une fenêtre glissante de forme Gaussienne agit à la manière d'un filtre passe bas. La fenêtre Gaussienne est généralement préférée afin de ne pas dénaturer le signal lidar. Ce filtrage a un double intérêt : il permet d'une part de s'affranchir d'éventuels bruits de hautes fréquences pouvant apparaître suite à l'amplification et à la numérisation du signal. D'autre part, il permet de lisser des échos pouvant présenter de multiples pics de faible amplitude, transformant une série d'échos proches dont l'analyse pourrait s'avérer compliquée en un écho élargi plus facilement utilisable (dans le cadre de notre étude).

7.2.3 Etalonnage

Lorsque cela est possible, et toujours si l'instrument ne réalise pas cette opération par lui-même, il est possible d'effectuer la conversion du signal lidar afin qu'il représente une grandeur physique telle que la puissance du signal collecté, ou même la réflectivité de la scène observée. Cette opération peut être de nature différente selon l'instrument et le type d'étalonnage. De façon générale, on s'attend plutôt à un système linéaire et, l'offset ayant été annulé auparavant, l'étalonnage revient à multiplier le signal par une constante dépendant des caractéristiques du système.

$$\tilde{S}(R) = C_{etalonnage} S(R) \tag{7.2.2}$$

7.3 Décomposition du signal lidar

Un signal lidar onde complète renferme une grande quantité d'information. Par contre, il n'est pas toujours aisé de manipuler cette information sous sa forme brute, c'est à dire une série de valeurs successives formant le signal onde complète. Pour cette raison, une des premières idées pour simplifier le traitement de l'information est l'extraction des parties du signal jugées intéressantes. Ces parties sont généralement celles correspondant à une forte amplitude, signature de la présence d'un objet dans la scène observée. Nous les appellerons « échos ».

L'extraction d'échos à partir d'un signal lidar onde complète consiste à séparer le signal $S(R)$ en une série de sous parties, les échos $(e_i(R))_{i=1..n}$. Suivant l'objectif recherché, la meilleure façon de séparer le signal en une série d'échos peut varier. Dans notre cas, nous chercherons à satisfaire les critères suivants :

- Le nombre n d'échos obtenus à partir d'un signal doit être suffisamment élevé pour que peu d'information inutile soit stockée (la séparation évidente du signal en un seul écho $e_1(R) = S(R)$ n'est pas intéressante).
- Le nombre n d'échos doit être suffisamment faible pour permettre une économie en terme de stockage des données (la séparation évidente du signal en la somme de ses valeurs successives n'est pas intéressante).
- L'information perdue en approchant le signal par la somme de ses échos doit être minimale.

En d'autres termes, on cherchera à minimiser la différence :

$$\Delta = S(R) - \sum_{i=1}^{n} e_i(R) \tag{7.3.1}$$

avec un nombre n d'échos ni trop élevé ni trop faible, dont le choix est en grande partie conditionné par les objectifs applicatifs.

Afin de pousser encore plus loin l'extraction des données contenues dans le signal lidar onde complète, on procède également à l'approximation des échos lidar par un modèle paramétrique décrivant leur forme.

La combinaison entre la détection des échos et leur représentation par un modèle paramétrique f à m paramètres $(X_j)_{j=1..m}$ tel que :

$$S(R) \approx \sum_{i=1}^{n} f_i(R, X_1, ..., X_m) \tag{7.3.2}$$

est appelée « décomposition du signal lidar ». Selon les méthodes utilisées, la détection des échos et leur approximation par le modèle paramétrique peut être réalisée simultanément, ou bien séparément.

7.3.1 Etat de l'art

Plusieurs méthodes performantes ont été développées pour décomposer le signal lidar en une série d'échos, et les plus efficaces d'entre elles consistent à approcher le signal lidar onde complète par une somme d'échos de forme Gaussienne, forme dont *Wagner* et al. *(2006)* a montré qu'elle donnait de bons résultats pour les scanners laser aéroportés utilisés habituellement pour la topographie.

La plupart de ces méthodes utilisent un algorithme des moindres carrés non linéaire (nonlinear least square) (*Hofton* et al. *(2000)*,*Qin* et al. *(2012)*), une méthode du maximum de vraisemblance (maximum likelyhood) avec l'algorithme d'espérance-maximisation (expectation maximization, EM) (*Roncat* et al. *(2008)*, *Persson* et al. *(2005)*), voire même des méthodes basées sur les ondelettes (*Wang (2012)*), ou des processus marqués (*Mallet* et al. *(2010)*).

Chauve et al. *(2007)* a montré que dans le cas de données lidar en contexte forestier, il pouvait être intéressant d'utiliser un modèle non Gaussien, et propose deux alternatives : un modèle log-normal et un modèle Gaussien généralisé symétrique.

Dans la plupart des cas, les méthodes de décomposition des échos sont initialisées par une première phase de détection des maxima locaux qui permet d'obtenir une première ébauche du nombre n ainsi que de la position des échos. Ces paramètres sont bien entendu susceptibles d'évoluer au cours de l'optimisation.

Ces différentes méthodes donnent toutes des résultats très satisfaisants. Elles diffèrent surtout par la complexité de leur mise en œuvre et par la finesse du résultat produit. Dans le cadre de notre étude, nous préfèrerons nous munir d'une méthode simple et transparente possédant l'avantage de calculs très rapides au détriment de la précision dans la représentation des signaux.

7.3.2 Détection des échos

Dans un premier temps, nous avons opté pour une méthode simple de décomposition des signaux lidar. Pour des raisons de simplicité de mise en œuvre et de rapidité des calculs, nous avons opté pour une décomposition en deux étapes, en réalisant tout d'abord la détection des échos, puis leur approximation par un modèle paramétrique.

La détection des échos a été réalisée à partir du principe de seuillage. Etant donnée une valeur seuil γ, on définit un écho comme une partie du signal entièrement supérieure à γ. Cette première définition permet déjà d'approcher un signal par une série d'échos tout en se débarrassant de toutes les valeurs du signal inférieures à γ. Le résultat de cette détection est présenté sur la figure 7.1.

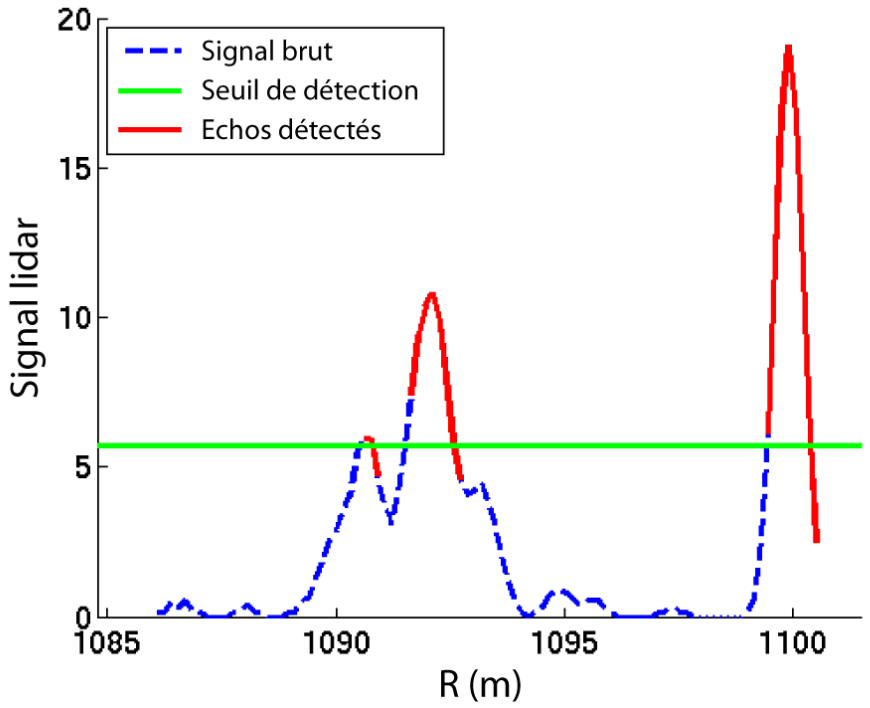


Figure 7.1 – *Exemple de détection d'échos par seuillage simple. Le seuil a été fixé à* 30% *de la valeur maximale du signal.*

Cette première méthode possède un inconvénient majeur : selon la valeur choisie pour le seuil γ, même le signal lidar le plus simple (un seul écho Gaussien) sera restitué de manière différente. Il sera en effet tronqué à une hauteur dépendant de γ. Afin de résoudre ce problème, et d'obtenir une séparation en écho la moins dépendante possible du paramètre γ, nous allons compléter les échos obtenus par la méthode de seuillage. Pour ce faire, on procède, en partant des extrémités de l'écho, à une descente progressive limitée par un critère sur la pente du signal. Le procédé se résume à l'algorithme suivant :

On réalise la détection simple des échos grâce au seuil γ. Pour chaque écho $e_i(R)$ ($R \in [R_{min,i}, R_{max,i}]$détecté, on réalise les opérations suivantes :

1. A partir du début de l'écho, on complète l'écho par les valeurs précédentes du signal tant que la pente reste positive ou nulle plus de deux fois consécutivement.
2. A partir de la fin de l'écho, on complète l'écho par les valeurs suivantes du signal tant que la pente reste négative ou nulle plus de deux fois consécutivement.

De cette manière, un écho Gaussien unique sera restitué de manière identique quelle que soit la valeur du seuil γ (à la seule condition que la valeur maximale de l'écho soit supérieure au seuil γ). Un signal plus complexe sera quant à lui débarrassé de toutes ses valeurs inférieures à γ et non directement liées à un écho d'amplitude supérieure à γ. Un exemple résultat alors obtenu est présenté sur la figure 7.2.

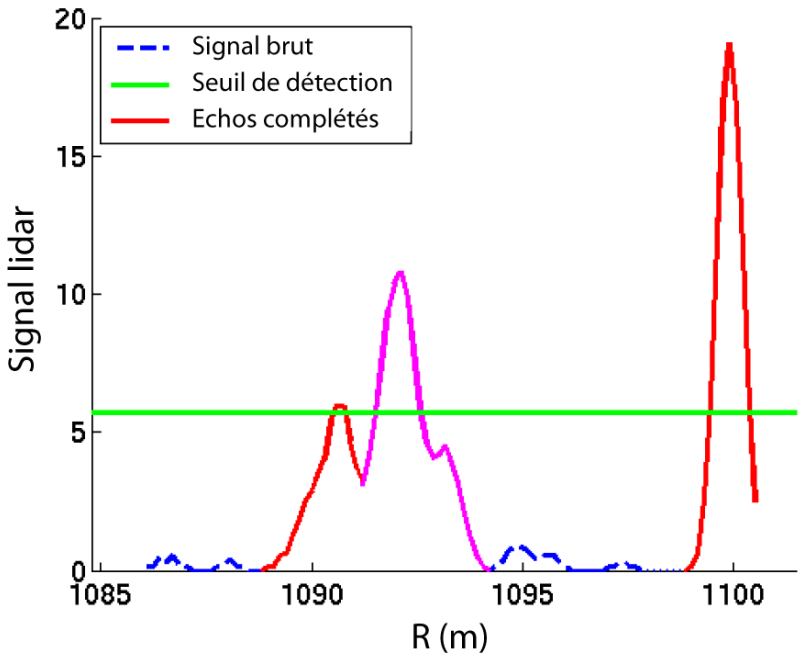


Figure 7.2 – *Exemple de détection d'échos par seuillage avec échos complétés. Le seuil a été fixé à 30% de la valeur maximale du signal.*

Dans la suite, de manière à éviter d'utiliser une valeur aberrante pour le seuil γ, nous utiliserons comme seuil une fraction de la valeur maximale de chaque signal. Ainsi, nous serons assurés de toujours détecter au moins un écho dans chaque signal.

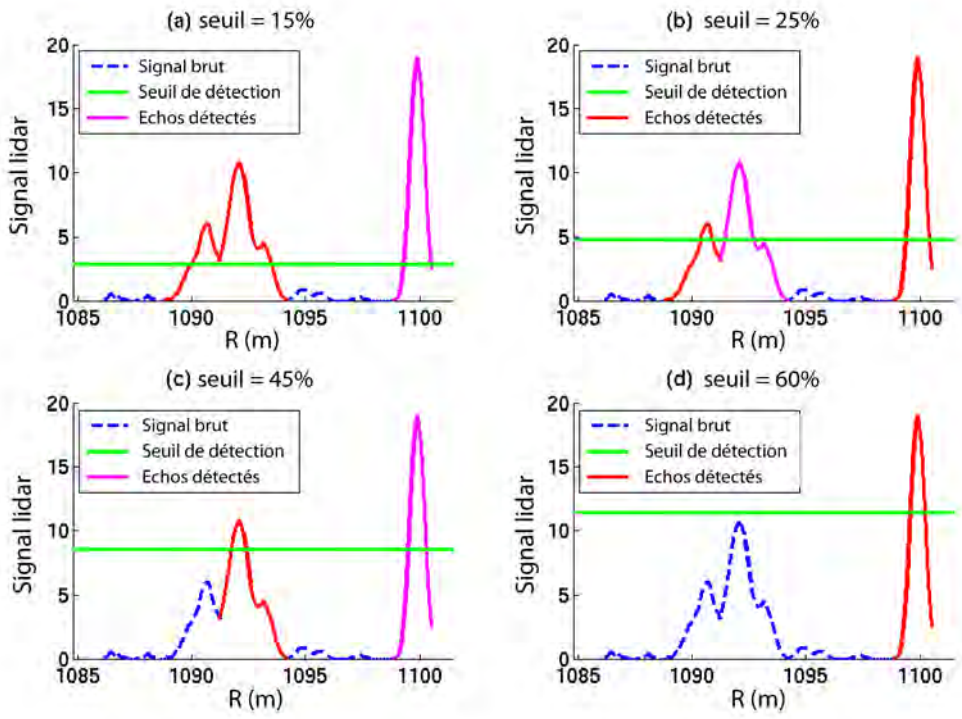


Figure 7.3 – *Détection d'échos par seuillage avec échos completés pour 4 valeurs différentes du seuil.*

La figure 7.3 montre les échos détectés à partir d'un signal lidar en utilisant différentes valeurs de seuil. On peut visualiser plusieurs phénomènes importants :

- en (a), le seuil est trop bas, ce qui ne permet pas de séparer les deux pics composant le premier écho.
- en (b), le seuil a une valeur suffisante pour séparer les deux premiers échos. On peut observer que grâce à la tolérance introduite dans la méthode de complétion des échos, le deuxième écho détecté ici est détecté entièrement malgré un faible pic intermédiaire.
- en (c) et (d), le seuil est trop élevé ce qui ne permet pas de détecter correctement tous les échos en présence.

La figure 7.3 permet également d'illustrer le principe de la détection d'échos énoncé précédemment avec l'équation 7.3.1. Les deux premiers exemples (a) et (b) fournissent tout deux des décompositions en échos du signal initial efficaces sur le plan de la représentativité. La somme des échos détectés est quasiment égale au signal initial. Ce n'est pas du tout le cas des deux derniers exemples (c) et (d) pour lesquels le seuil est trop élevé. La différence entre les deux premiers exemples illustre la problématique du nombre d'échos détectés. Il n'est pas évident de choisir entre la situation (a) et la situation (b). En effet, (b) semble mieux décrire la forme générale du signal en séparant les deux premiers échos. Cependant, si l'on cherche à séparer les échos de végétation des échos de surfaces dures, un seul écho élargi (comme en (a)) sera peut-être plus facilement assimilable à de la végétation.

7.3.3 Un modèle d'écho asymétrique

La modélisation d'un signal par une succession d'échos est certes intéressant en termes de la réduction de la quantité des données à stocker, mais il est permis de s'interroger, dès lors que l'on a réduit chaque signal à une série d'échos, sur l'intérêt du lidar onde complète par rapport à un système à retours discrets, qui fournit directement les échos successifs sous forme de points 3D.

Tout d'abord, si nous avons séparé le signal en échos, nous n'avons pas pour autant dégradé l'information « onde complète » en une information « nuage de points ». Les échos sont, pour l'instant, des fractions de signal, dont on a conservé la forme intacte. Le passage à un nuage de points se fait en ramenant chaque écho à un point dont la position dans l'espace dépend de la direction de visée et de la distance R mesurée par l'instrument pour l'écho considéré. Les systèmes commerciaux multi-échos fournissent souvent une donnée supplémentaire sur l'amplitude de l'écho. Nous souhaitons ici aller plus loin en conservant la forme précise de l'écho.

Dans cette optique, et en conservant l'idée de réduire la quantité d'information à stocker pour décrire un signal, il est possible de modéliser chaque écho au moyen d'un modèle analytique décrivant sa forme. De telles solutions ont déjà été mises en place, notamment par *Wagner* et al. *(2006)* avec un modèle Gaussien, puis par *Chauve* et al. *(2007)* avec un modèle log-normal, et un modèle Gaussien généralisé symétrique.

Inspirés par la forme typiquement asymétrique des échos rencontrés lors de l'observation de couverts végétaux, nous proposons ici un nouveau type de modèle Gaussien généralisé incluant un paramètre d'asymétrie.

Expression du modèle Gaussien généralisé asymétrique

$$f_{GG}(R) = N + \frac{A}{\left(1 - \frac{k}{a}(R - R_0)\right)} e^{-y(R)^2} \tag{7.3.3}$$

où y est défini par :

$$y(R) = \begin{cases} -\frac{1}{k} \ln\left[1 - \frac{k(R-R_0)}{a}\right] & \text{si } k \neq 0 \\ \frac{R-R_0}{a} & \text{si } k = 0 \end{cases} \tag{7.3.4}$$

Le domaine de définition de cette fonction est conditionné par la valeur du paramètre k : si $k = 0$ le modèle revient à une Gaussienne classique définie sur $\Re$ tout entier ; si $k < 0$, $R \in [e + \frac{a}{k}, +\infty[$; si $k > 0$, $R \in]-\infty, e + \frac{a}{k}]$.

Le modèle comporte 5 paramètres. N représente un éventuel bruit de fond. On le fixera généralement à $N = 0$ étant donné le traitement préliminaire réalisé sur les signaux. A est l'amplitude de l'écho. Dans le cas symétrique ($k = 0$), c'est sa valeur maximale et R_0 est la position du maximum de l'écho. Notons ici qu'il s'agit de la position interpolée du maximum du modèle représentant l'écho. R_0 n'est donc pas soumis à la contrainte d'échantillonnage du signal. k est le paramètre d'asymétrie du modèle. Si $k > 0$, le modèle « penche à droite », si $k < 0$, le modèle « penche à gauche », et si $k = 0$, on est ramenés à la loi Gaussienne classique. C'est ce paramètre qui constitue une nouveauté par rapport au modèles symétriques largement utilisés par la communauté. Enfin, a est le paramètre d'élargissement. a est toujours strictement positif. Dans le cas symétrique où $k = 0$, a est le double de la variance.

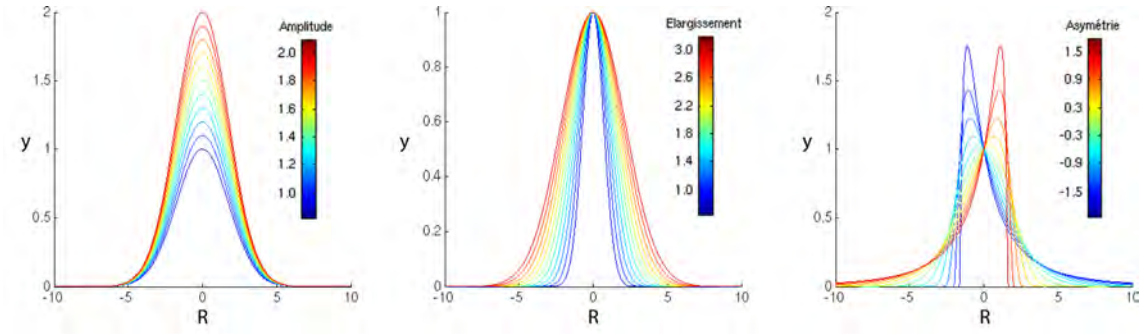


Figure 7.4 – *Sensibilité du modèle Gaussien généralisé à ses trois paramètres de forme. De gauche à droite : l'amplitude A, l'élargissement a et l'asymétrie k.*

La figure 7.4 donne une illustration de l'aspect général du modèle Gaussien généralisé lorsque les trois paramètres de forme A, a et k varient.

Méthode d'approximation des échos

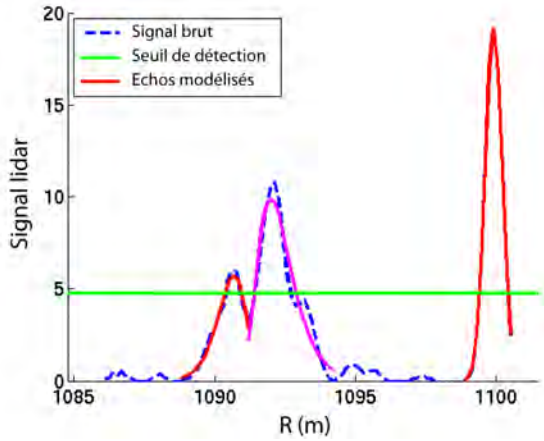


Figure 7.5 – *Approximation des échos détectés par des modèles Gaussiens généralisés*

Nous allons maintenant chercher à approcher au mieux chaque écho $e_i(R)$ détecté par un modèle Gaussien Généralisé $f_{GG}(N, R_0, A, a, k, R)$. On utilise pour cela l'algorithme de Marquardt-Levenberg en minimisant le critère :

$$\delta = \sum_R [e_i(R) - f_{GG}(N, R_0, A, a, k, R)]^2 \tag{7.3.5}$$

L'algorithme d'optimisation est initialisé à partir d'un modèle Gaussien généralisé symétrique centré sur le maximum de l'écho, dont l'amplitude est égale à ce maximum, et dont la largeur est identique à celle de l'impulsion laser émise.

La figure 7.5 montre le résultat de l'approximation par des modèles Gaussiens généralisés des échos détectés dans la section 7.3.2.

7.4 Résultats, robustesse

7.4.1 Jeux de données

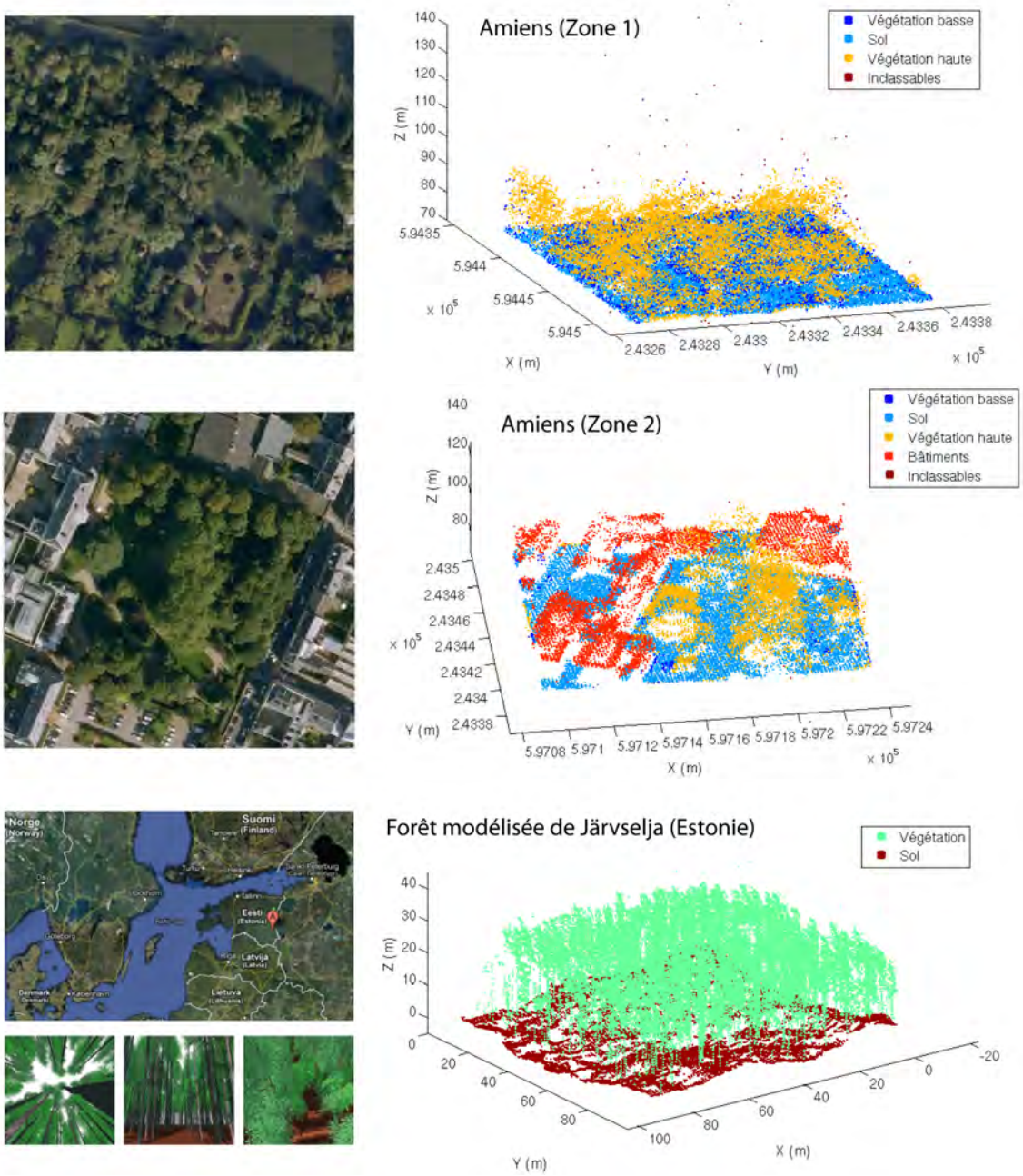


Figure 7.6 – *Nuages de points classifiés de référence pour les deux jeux de données acquis sur la ville d'Amiens (données réelles, IGN) et sur la forêt tempérée de Järvselja, Estonie (données simulées, modèle DELiS).*

Nous avons appliqué les algorithmes de détection d'échos et de modélisation des échos par le modèle Gaussien généralisé à un échantillon de jeux de données comprenant :

- Des données réelles acquises par l'IGN au dessus de la ville d'Amiens. Nous disposons de deux zones de végétation différentes situées en périphérie de la ville (zone 1) et sur une place du centre ville (zone 2).
- Des données simulées grâce à DELiS sur le modèle réaliste de forêt de Järvselja.
- Des données simulées sur une série de couches de végétations idéalement planes et homogènes.

Les données simulées ont été réalisées grâce au modèle DELiS et en utilisant un lidar à $1557nm$ dont les paramètres sont décrits dans la table 4.3 (voir chapitre 4). Le lidar est embarqué à bord d'un avion volant à une altitude de 1100m et balayant la scène à l'aide d'un dispositif à polygone rotatif produisant une densité de points au sol de 3 à 4 points par mètre carré (dépendant de l'angle de visée).

Pour chacun des jeux de données, nous disposons d'une classification de référence. Pour les données simulées, connaissant le modèle numérique de terrain utilisé lors des simulations, il est possible de discriminer les échos lidar en deux classes « sol » et « non sol » (donc végétation, y compris branchages s'il y en a) par simple proximité géométrique. Pour les jeux de données réels, une classification a été réalisée grâce aux outils développés par l'IGN. La classification a ensuite été corrigée et validée manuellement par un opérateur de sorte que l'on peut lui accorder une grande confiance. Les jeux de données réels sont classifiés en 5 classes : « sol », « végétation haute », « végétation basse », « bâtiments » et une dernière classe regroupant les points incohérents ou inclassables.

La figure 7.6 montre les nuages de points extraits de ces trois jeux de données ainsi que les classifications de référence disponibles.

7.4.2 Choix du seuil pour la détection des échos

Afin de formuler une recommandation pour la valeur du seuil à utiliser lors du processus de détection des échos, nous avons testé plusieurs valeurs pour ce paramètre sur les jeux de données disponibles.

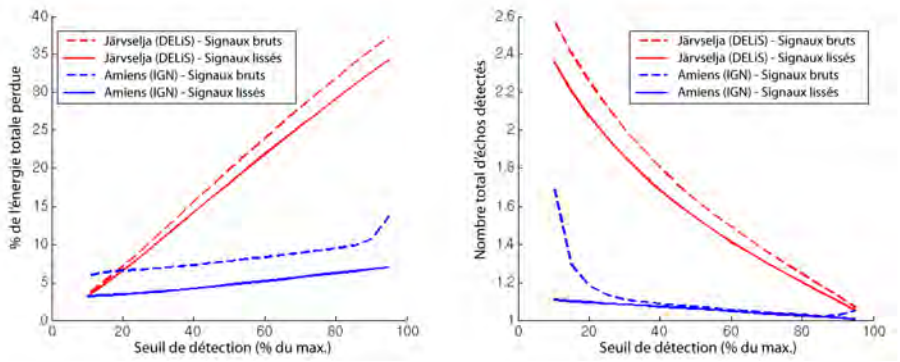


Figure 7.7 – *Energie totale perdue lors du processus de détection d'échos (à gauche) et nombre moyen d'échos détectés par signal (à droite) en fonction du seuil choisi pour la détection. Résultats obtenus sur le forêt tempérée de Järvselja (données simulées) et sur la ville d'Amiens (données réelles, IGNs). Les deux jeux de données d'Amiens donnent des résultats similaires. Pour cette raison, nous montrons uniquement les résultats obtenus pour la zone 2.*

La figure 7.7 montre l'effet du seuil sur l'énergie perdue lors du processus de détection d'échos, et sur le nombre moyen d'échos détectés. On constate naturellement que plus le seuil est élevé, plus le nombre d'échos détectés par signal est faible. Tous les échos dont l'amplitude est inférieure au seuil sont oubliés. La conséquence de ces oublis est une plus grande énergie perdue au cours du processus.

Les différences notables observées entre les deux jeux de données s'expliquent en partie par la nature différente de la scène observée (forêt tempérée avec végétation haute dans le cas des données simulées, et végétation urbaine dans le cas des données réelles). On trouve moins d'échos multiples dans le jeu de données réel, et en conséquence, moins d'échos sont oubliés lorsque la valeur du seuil augmente.

L'énergie perdue lors de la détection d'échos permet de situer les valeurs pertinentes pour le seuil aux environs de 20%. En effet, pour ces valeurs, l'énergie écartée lors de la détection des échos est de l'ordre de 5%. Considérer que 5% de l'énergie totale est inutile revient à estimer que l'on se trouve en présence d'un rapport signal sur bruit de 20, ce qui est une valeur réaliste. Considérant que la détection d'écho ne conserve que les parties du signal dont la valeur est suffisamment élevée, on peut raisonnablement supposer que l'énergie perdue dans le processus est en grande partie la part des signaux liée au bruit. Dans tout ce qui va suivre, nous utiliserons donc systématiquement l'algorithme de détection d'échos avec complétion des échos et un seuil égal à 20% de la valeur maximale du signal.

7.4.3 Evaluation de la qualité de la modélisation des échos

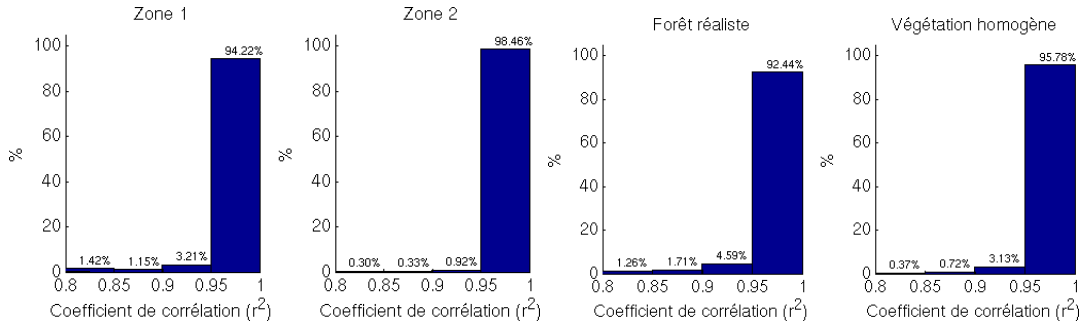


Figure 7.8 – *Distribution des coefficients de corrélation obtenus pour la modélisation des échos issus des jeux de données réels acquis au dessus de la ville d'Amiens (données IGN) et pour les jeux de données simulés sur la forêt tempérée de Järvselja (simulations DELiS) et pour une couche de végétation homogène.*

La figure 7.8 montre les corrélations obtenues lors de la comparaison entre les échos lidar bruts et leur approximation par le modèle Gaussien généralisé asymétrique. Quel que soit le jeu de données, réel ou simulé, le modèle Gaussien généralisé asymétrique s'avère bien adapté à la description de la forme des échos lidar. On obtient en effet dans chaque cas un coefficient de corrélation $r^2 > 0.9$ pour plus de 97% des échos.

Au vu de la figure 7.5, il est permis de se demander si, bien que la qualité générale de l'approximation des échos par le modèle Gaussien généralisé asymétrique soit très bonne (plus de 90% des échos approchés avec un coefficient de corrélation r^2 supérieur à 0.95 dans tous les cas), l'information extraite est de bonne qualité. Sur la figure 7.5, on remarque en effet que les échos de végétation sont approchés par des modèles dont l'amplitude ne coïncide pas parfaitement avec la valeur maximale des échos.

La figure 7.9 montre le résultat de la comparaison entre les paramètres issus du modèle et les paramètres « naturels » des échos lidar extraits. On constate que la corrélation entre l'amplitude de l'écho et l'amplitude du modèle est finalement très bonne (corrélation supérieure à 0.98), et de même pour les énergies totales. Notons ici qu'une bonne corrélation est obtenue entre le paramètre d'amplitude A du modèle Gaussien généralisé et la valeur maximale des échos bien que, dès lors que le modèle Gaussien généralisé est asymétrique ($k \neq 0$), A n'est pas la valeur maximale du modèle Gaussien généralisé.

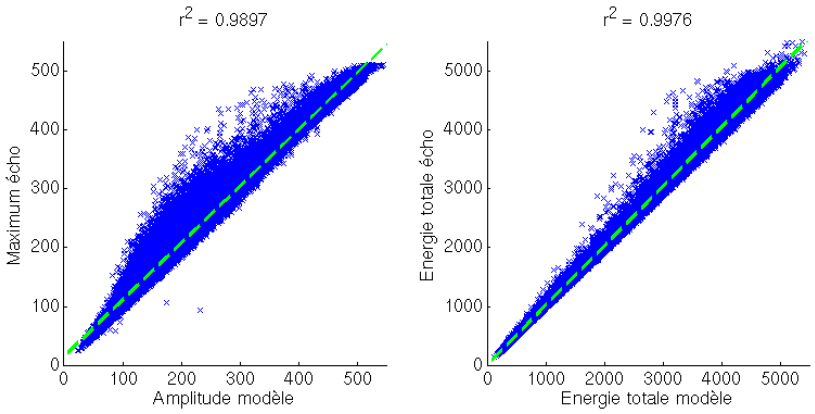


Figure 7.9 – *Corrélation entre l'amplitude et l'énergie totale du modèle Gaussien généralisé asymétrique et les amplitudes et énergies de l'écho initial pour le jeu de données simulé sur la forêt de Järvselja. De gauche à droite, corrélation entre : l'amplitude du modèle Gaussien généralisé et le maximum de l'écho, l'énergie totale du modèle et l'énergie totale de l'écho.*

7.4.4 Distribution des paramètres de forme

Nous appliquons donc l'algorithme de modélisation par le modèle Gaussien généralisé asymétrique à chacun des échos détectés. Ceci étant fait, nous obtenons un nuage de points enrichi de l'information de forme de chaque écho lidar, cette forme étant représentée par les paramètres de la Gaussienne généralisée. Il nous est donc possible de visualiser la manière dont sont distribuées les valeurs prises par chacun des paramètres. On retiendra ici les trois paramètres principaux que sont l'amplitude A, le paramètre d'élargissement a et le paramètre d'asymétrie k.

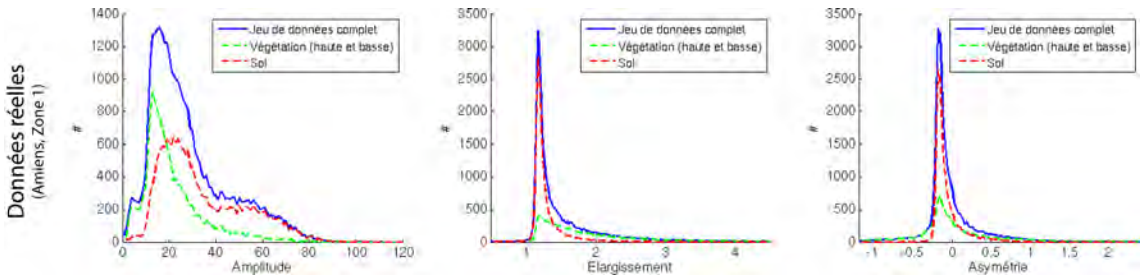


Figure 7.10 – *Distributions des paramètres du modèle Gaussien généralisé asymétrique obtenues pour le jeu de données acquis sur Amiens (Zone 1, données réelles IGN).*

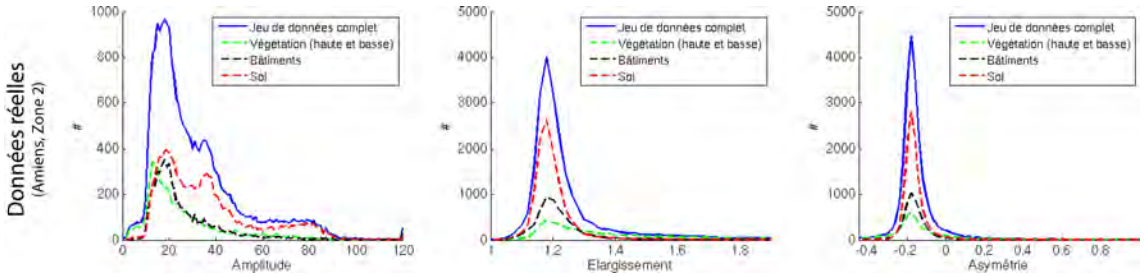


Figure 7.11 – *Distributions des paramètres du modèle Gaussien généralisé asymétrique obtenues pour le jeu de données acquis sur Amiens (Zone 2, données réelles IGN).*

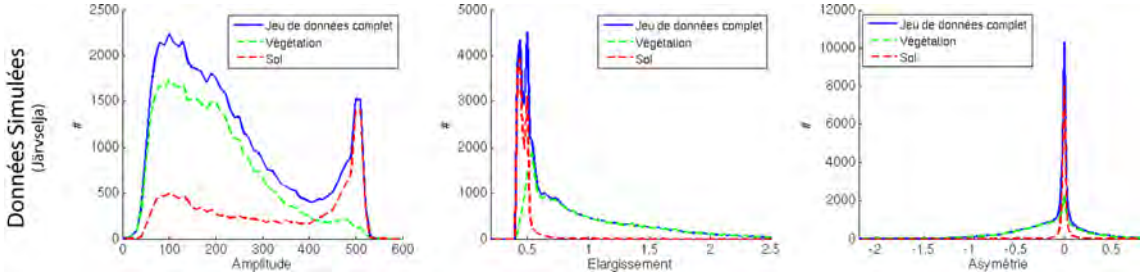


Figure 7.12 – *Distributions des paramètres du modèle Gaussien généralisé asymétrique obtenues pour le jeu de données acquis sur la forêt tempérée de Järvselja (données simulées, DELiS).*

Les figures 7.10, 7.11 et 7.12 montrent les distributions obtenues pour chacun des jeux de données de test, ainsi que le détail des distributions de chaque paramètre à l'intérieur des classes de référence. Ces visualisations permettent de dégager plusieurs tendances générales : en premier lieu, les échos de sol ont tendance à être d'amplitude légèrement plus élevée que les échos de végétation. Ce phénomène peut s'expliquer par des différences de propriétés optiques à la longueur d'onde concernée, mais surtout par la nature poreuse des feuillages. Ainsi même si le sol et les feuilles constituant la végétation ont des réflectances équivalentes, la végétation donnera des échos d'amplitude plus faible. On constate également que les échos de végétation donnent lieu, comme on pouvait s'y attendre, à des élargissements légèrement plus élevés ainsi qu'à des échos asymétriques.

Le caractère plus marqué de tous ces phénomènes pour le jeu de données de la forêt de Järvselja peut s'expliquer par la nature différente de la scène. La forêt modélisée offre en effet une couche de végétation haute bien distincte du sol alors que les deux zones observées à Amiens possèdent plus de zones de végétation basse au sein de laquelle les différents phénomènes mis en jeu sont moins aisément séparables.

Enfin, la visualisation de la distribution du paramètre d'amplitude A des échos permet de constater dans le cas de la Zone 2 (figure 7.11) que les bâtiments offrent des échos d'amplitude semblable aux échos de végétation, et que ces deux classes pourront donc s'avérer difficiles à séparer. Cet effet est également du à l'utilisation d'une nature de sol unique pour les données simulées, alors que les propriétés d'un sol réel peuvent varier d'une zone à l'autre, d'où une distribution des amplitudes des échos de sol plus resserrée pour le jeu de données simulé. Cette variabilité des propriétés optiques du sol est d'ailleurs encore plus marquée dans le cas de la zone semi-urbaine qui présente de nombreuses surfaces différentes (herbe, graviers, bitume, etc...).

7.5 Conclusion

Nous avons montré dans ce chapitre comment il est possible d'extraire une information très riche d'un jeu de données lidar onde complète. Nous procédons ici en deux étapes successives :

- Tout d'abord les signaux sont scindés en échos lidar par une méthode de seuillage avec complétion des échos sur un critère de pente. Cette méthode est relativement simple, mais elle suffit à nos besoins et présente l'avantage d'être aisément applicable avec des temps de calcul très raisonnables.
- Ensuite, les échos détectés sont approchés par un modèle paramétrique Gaussien généralisé asymétrique. Le choix de ce modèle consiste en une avancée significative par rapport aux méthodes pré-existantes qui utilisent exclusivement des modèles symétriques. Nous avons montré que ce modèle permet de rendre compte de la forme des échos issus de jeux de données différents avec de très bonnes corrélations ($r^2 > 0.9$).

Cette démarche est schématisée sur la figure 7.13.

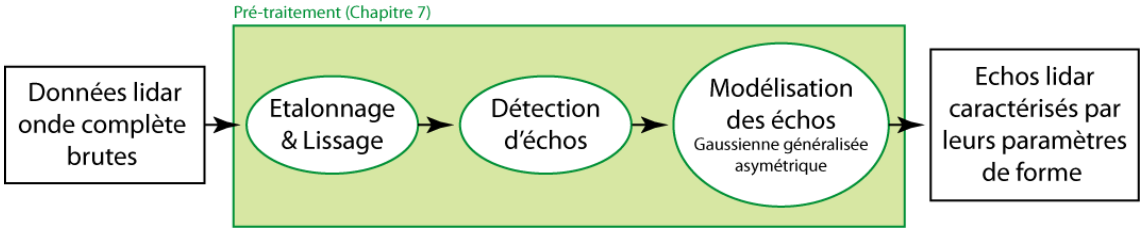


Figure 7.13 – *Schéma de principe reprenant la démarche de traitement des données lidar onde complète depuis leur forme brute jusqu'à l'obtention d'un nuage d'échos lidar caractérisés par leurs paramètres de forme.*

Dans la suite de notre travail, nous nous attacherons à montrer comment les informations extraites des signaux lidar onde complète peuvent être utilisées pour séparer les échos provenant du sol de ceux provenant de la végétation.

Au cours de notre analyse de l'état de l'art, nous avons vu que les méthodes les plus évoluées de décomposition du signal lidar procèdent à la détection des échos et à leur approximation par un modèle paramétrique au sein d'un seul et même algorithme d'optimisation. Les échos ne sont alors plus vraiment détectés, mais directement approchés par le modèle paramétrique. L'étape suivante de développement de notre méthode pourrait consister à implémenter un tel algorithme utilisant le modèle Gaussien généralisé asymétrique.

Chapitre 8

Classification des données lidar onde complète

Sommaire

8.1 Introduction **125**
8.2 Etat de l'art **126**
8.3 Une classification simple : dernier écho **127**
8.4 Modèles de mélange Gaussien **130**
8.4.1 Métriques utilisées 130
8.4.2 Principe de la classification 130
8.4.3 Résultats 132
8.5 Correction grâce à la méthode « dernier écho » **135**
8.6 Choix d'une classification pour la suite **136**
8.7 Conclusion **137**

8.1 Introduction

L'objectif de cette étape est la séparation des échos lidar de nos jeux de données en deux catégories : les échos provenant de la végétation, et ceux provenant du sol, de bâtiments ou d'objet disposés sur le sol.

Afin de distinguer un écho de végétation des autres échos lidar, il est possible de s'appuyer sur plusieurs méthodes. Après un état de l'art, nous verrons dans un premier temps comment il est possible d'identifier des échos lidar provenant de la végétation en examinant la position géométrique d'un point 3D par rapport à celle de ses voisins. Cette technique possède l'avantage de ne pas nécessiter une approche de type onde complète. D'autres méthodes tentent de tirer parti des informations supplémentaires apportées par le lidar onde complète, éventuellement combinées à une approche géométrique.

Nous présentons dans ce chapitre une méthode mise en place pour classifier un jeu de données lidar onde complète à partir des paramètres extraits de la modélisation des échos lidar par le modèle Gaussien généralisé asymétrique présenté précédemment.

8.2 Etat de l'art

De nombreux travaux ont été engagés en classification des données lidar. En particulier, le problème de la détection des échos de végétation a été adressé dans le domaine de la topographie afin de produire des modèles numériques de terrain non perturbés par les zones de couvert végétal.

Initialement, les scanners laser aéroportés ne fournissaient pas l'information de type onde complète, mais uniquement une série d'échos lidar par impulsion laser (voire un écho unique), en assortissant parfois les échos détectés d'une mesure de l'amplitude du signal retour. Il est donc naturel que les premières méthodes de classification se soient tournées vers l'étude de la distribution géométrique des points issus des échos lidar, plutôt que d'en considérer les propriétés de forme.

Une première méthode, la plus simple qui soit, consiste à considérer que si le lidar observe une zone comportant de la végétation alors il en résultera de multiples échos, que les premiers échos proviendront de la végétation, et le dernier écho reviendra du sol. Cette technique nécessite seulement un scanner à retours discrets du type « multi-échos ». Elle permet d'obtenir des résultats intéressants dans les situations où la végétation n'est pas trop dense et bien séparée du sol, mais elle présente cependant des points faibles évidents. Dans le cas par exemple d'une zone de végétation dense, si aucun écho de sol n'est visible, le dernier écho sera toujours identifié comme un écho de sol alors qu'il provient en fait d'une couche épaisse de végétation. Par la suite, nous verrons comment cette information peut être utilisée pour corriger une classification obtenue par une autre méthode (voir section 8.5).

Il est également possible, en considérant la distribution géométrique des points avoisinant un point P du nuage de points 3D, d'obtenir une bonne indication sur la nature de la surface diffusante associée. Si les points semblent suivre une surface plane, il est probable que le point P soit issu d'un bâtiment, ou du sol. Si par contre les points avoisinant P sont répartis de façon plus chaotique, cela tend à suggérer que P est issu d'une surface végétale. A titre d'exemple, *Charaniya* et al. *(2004)* utilise une série de métriques extraites de la position relative des points voisins, ainsi que la différence d'altitude entre le premier et dernier écho des signaux lidar pour réaliser une classification supervisée en milieu urbain pour séparer un jeu de données lidar en quatre classes (batiments, routes, herbe et arbres). *Charaniya* et al. *(2004)* a également recours à la valeur de la luminance issue d'une image classique acquise au moment du scan laser aéroporté. Un autre exemple de combinaison d'une image aéroportée avec les données lidar pour leur classification est présenté par *Secord et Zakhor (2007)*.

Le problème principal inhérent à ce type de méthodes est la complexité algorithmique de la recherche des voisins d'un point donné. A moins d'avoir préalablement été organisé de façon optimale, le jeu de données dans sa totalité doit en effet être considéré et traité afin de parvenir à l'identification du voisinage d'un point unique.

Très rapidement, la possibilité d'étudier la forme des échos lidar grâce aux systèmes onde complète a laissé envisager des méthodes plus efficaces et plus rapides consistant à classifier les points grâce à une série de métriques extraites en partie de l'information onde complète et en partie d'informations annexes telles que le numéro d'écho, l'altitude, etc... Parmi ces méthodes, on trouve par exemple les arbres de décision (*Höfle* et al. *(2012)*, *Rutzinger* et al. *(2008)*, *Wagner* et al. *(2008)*), ou le support vecteur machine (SVM).

Mallet et al. *(2011)*, utilise une classification de type SVM avec une série de 27 métriques issues de l'information onde complète, de la numérotation et de l'écart en altitude des échos à l'intérieur d'un même signal, et de l'étude par l'analyse en composantes principales du voisinage géométrique de chaque point. Un algorithme de sélection des métriques est alors mis en place afin de brosser un tableau complet de l'importance des différentes métriques pour la classification des données lidar en trois classes : végétation, bâtiments et sol.

Le principal inconvénient de ces méthodes réside, comme nous l'avons déjà évoqué, dans la nécessité de considérer la totalité du nuage de points afin de tirer parti de la distribution géométrique relative des points. D'autre part, les méthodes de classification du type SVM les plus largement utilisées sont des classifications supervisées, c'est à dire qu'elles nécessitent que l'utilisateur fournisse à l'algorithme un échantillon de points sûrs pour chaque classe attendue. En général, c'est la connaissance a priori de la zone étudiée, ainsi que des images aéroportées ou satellitaires classiques qui permettent d'isoler les échantillons qui permettront de procéder à la phase d'apprentissage du classifieur. Néanmoins, le choix et la qualité de ces échantillons peuvent souvent être mis en doute.

Pour cette raison, nous proposons ici une approche plus simple de classification non supervisée d'un jeu de données lidar. La mise en place d'une nouvelle méthode plus simple, et donc également moins robuste, a également été rendue possible par la nature relativement simple de la classification dont nous aurons besoin, à savoir la séparation en deux classes « végétation » et « non végétation ». Nous avons également souhaité limiter la complexité des opérations nécessaires sur les données lidar en considérant uniquement les métriques directement calculables à partir d'un signal lidar unique.

8.3 Une classification simple : dernier écho

Avant de se lancer dans la formulation de notre méthode de classification, examinons une première idée très simple. Nous avons vu que dans le processus de traitement des signaux, un signal lidar unique peut donner lieu à plusieurs échos. Il est alors aisé de formuler un premier principe de base :

Un écho qui n'est pas le dernier écho du signal est forcément un écho de végétation.

Ce principe se vérifie aisément et possède pour seule exception le cas où une surface non-végétale intercepte une partie seulement de l'impulsion laser émise. Nous verrons que ce cas est peu fréquent d'autant que nous nous plaçons toujours dans le cas du scanner laser aéroporté à petite empreinte au sol (environ 0.5m de diamètre). Les surfaces qui nous intéressent (sol, bâtiments, ...) sont donc presque toujours de dimension bien supérieure à celle de la tâche laser au sol et les effets de bords sont peu fréquents.

Sur la base de ce principe simple, il est possible de construire une première classification selon laquelle :

- Les échos qui ne sont pas les derniers de leur signal d'origine sont des échos de type « végétation » (V).
- Les échos qui sont les derniers de leur signal d'origine sont des échos de type « Sol » (S).

Nous avons appliqué une telle classification aux trois jeux de données présentés en 7.4.1. Les résultats obtenus sont présentés et comparés aux classifications de référence dans les tables 8.1, 8.2 et 8.3 grâce aux matrices de confusion. Nous avons également calculé la précision globale $p_{globale}$ de la classification, les précisions a priori $p_{a\ priori}$ et a posteriori $p_{a\ posteriori}$ ainsi que le coefficient kappa standard κ (*Cohen (1960)*).

Table 8.1 – *Matrice de confusion et précision de la classification « dernier écho » sur le jeu de données de Järvselja (données simulées DELiS). Deux classes sont considérées : végétation (V) et sol (S). Elles sont comparées aux classes de référence V_{ref} et S_{ref}.*

	V_{ref}	S_{ref}	$p_{a\ posteriori}$
V	28080	14	99.95%
S	12512	16828	57.36%
$p_{a\ priori}$	69.18%	99.92%	

$p_{globale}$	$\kappa_{standard}$
78.19%	0.5640

Table 8.2 – *Matrice de confusion et précision de la classification « dernier écho » sur le jeu de données acquis sur la ville d'Amiens (Zone 1, végétation urbaine, données réelles IGN). Deux classes sont considérées : végétation (V) et sol (S). Elles sont comparées aux classes de référence V_{ref} et S_{ref}.*

	V_{ref}	S_{ref}	$p_{a\ posteriori}$
V	5718	45	99.22%
S	9229	19647	68.04%
$p_{a\ priori}$	38.26%	99.77%	

$p_{globale}$	$\kappa_{standard}$
73.23%	0.6295

Table 8.3 – *Matrice de confusion et précision de la classification « dernier écho » sur le jeu de données acquis sur la ville d'Amiens (Zone 2, zone semi-urbaine, données réelles IGN). Deux classes sont considérées : végétation (V) et sol (S). Elles sont comparées aux classes de référence V_{ref} et S_{ref}, les bâtiments ayant été inclus dans la classe S_{ref}.*

	V_{ref}	S_{ref} (Sol+Bâtiments)	$p_{a\ posteriori}$
V	1794	5 (136)	99.72% (92.95%)
S	4306	11831 (17634)	73.32% (80.37%)
$p_{a\ priori}$	29.41%	99.96% (99.23%)	

$p_{globale}$	$\kappa_{standard}$
75.96% (81.39%)	0.7067 (0.7814)

La précision a priori indique la probabilité qu'un point dont on sait qu'il appartient à une certaine classe de référence ait effectivement été bien classifié. La précision a posteriori indique, quant à elle, la probabilité qu'un point ayant été classifié comme appartenant à une certaine classe fasse effectivement partie de cette classe. $p_{a\ priori}$ indique donc la fraction de points d'une classe de référence dont la classification a été effectuée correctement, et $p_{a\ posteriori}$ la fiabilité de la classification réalisée. La précision globale est définie comme la fraction des points ayant été bien classifiés. Ce critère ne tient par contre pas compte du fait qu'une classification puisse fournir un résultat correct même en classant les points au hasard. Afin de tenir compte de cet effet, le coefficient κ standard de Cohen s'exprime comme le rapport :

Table 8.4 – *Qualité de la classification en fonction de la valeur du coefficient κ de Cohen. Valeurs communément admises par la communauté scientifiques et tirées de Landis et Koch (1977).*

κ	Interpretation
< 0	Désaccord
0.0 à 0.20	Accord très faible
0.21 à 0.40	Accord faible
0.41 à 0.60	Accord modéré
0.61 à 0.80	Accord fort
0.81 à 1.00	Accord presque parfait

$$\kappa = \frac{p_{globale} - p_{aleatoire}}{1 - p_{aleatoire}} \tag{8.3.1}$$

où $p_{aleatoire}$ est la probabilité d'obtenir aléatoirement une bonne classification. $p_{aleatoire}$ dépend donc essentiellement de la répartition des points au sein des classes créées et au sein des classes de référence. La table 8.4 donne une correspondance entre la qualité de la classification et la valeur de κ (*Landis et Koch (1977)*).

Ces résultats apportent plusieurs enseignements. Tout d'abord, ils permettent de conclure immédiatement sur l'insuffisance de la classification « dernier écho ». En effet, si l'on considère que les trois jeux de données sont composés respectivement à 30%, 57% et 75% d'échos provenant du sol (ou de bâtiments), la précision a posteriori (donc la proportion d'échos correctement classifiés) pour la classe « Sol »est à peine supérieure à la probabilité de classifier correctement les échos en les classant aléatoirement. Une telle classification est donc trop peu fiable dans sa désignation des échos de sol.

Cependant, d'autres points sont bien plus intéressants. La précision a priori pour la classe sol est très bonne (supérieure à 99%) dans les trois cas. Ceci nous indique que très peu de points correspondant au sol sont classés comme végétation. Les rares points concernés sont en fait des échos n'étant pas des derniers échos mais appartenant pourtant au sol ou aux bâtiments. C'est ce qui explique leur nombre plus élevé (136) pour la zone 2 du jeu de donnée réel d'Amiens. Les points concernés sont probablement des échos multiples obtenus sur les bords des bâtiments.

Autre aspect très intéressant : la précision a posteriori pour la classe végétation est excellente (supérieure à 99% dans tous les cas, excepté 92% pour la zone 2 d'Amiens qui contient des bâtiments). Ceci indique que la classification « dernier écho » désigne quasiment à coup sûr des échos de végétation. Elle pourra donc s'avérer très utile en complément d'une future classification afin de retirer de la classe « Sol » d'éventuels points de végétation restants.

8.4 Modèles de mélange Gaussien

8.4.1 Métriques utilisées

Une classification peut utiliser un nombre arbitraire de paramètres des échos aussi appelés « métriques ». Il nous appartient de choisir lesquels des paramètres décrivant la forme de l'écho nous allons effectivement utiliser lors de la classification. Nous pourrons également choisir d'utiliser d'autres informations telles que la numérotation des échos à l'intérieur de leur signal d'origine, ou la position géométrique du point 3D associé.

Dans ce qui va suivre, nous avons sélectionné plusieurs paramètres dont nous allons évaluer l'impact sur la classification :

- Les premiers paramètres évidents sont ceux du modèle Gaussien généralisé asymétrique utilisé pour décrire les échos. De ces paramètres, nous retiendrons surtout l'amplitude A, l'élargissement a et l'asymétrie k.
- Il est également possible d'utiliser la position géométrique des points 3D correspondants aux échos lidar. Celle-ci peut être exprimée dans différents référentiels suivant l'instrument et le traitement de géo-localisaiton qui a été appliqué aux données. Dans notre étude, nous supposerons simplement que Z est la coordonnée verticale et donc que X et Y définissent le plan horizontal. Des trois coordonnées (X, Y, Z), seule Z parait pertinente dans l'optique de séparer le sol de la végétation. X et Y pourront être utilisées dans un autre contexte si l'on cherche à distinguer des classes dont la répartition horizontale n'est pas homogène. L'origine du repère importe peu ici, en effet, en classification, ce sont les variations relatives de Z qui seront utilisées, et non les valeurs absolues.
- Nous utiliserons également la numérotation des échos à l'intérieur de leur signal d'origine, ainsi que le nombre total d'échos présents dans le signal. Dans la suite, nous appellerons n le rang de l'écho dans son signal d'origine (premier, deuxième, troisième écho) et N_{tot} le nombre total d'échos présents dans le signal d'origine. Ainsi $n = N_{tot}$ indiquera un dernier écho. Afin de réduire le nombre de paramètres à utiliser, on utilise parfois un « nombre d'échos normalisé » η défini comme

$$\eta = \frac{n}{N_{tot}} \tag{8.4.1}$$

- Enfin nous pourrons également utiliser l'énergie totale E_e présente dans l'écho, l'énergie totale E_s du signal d'origine (comprenant donc tous les échos du signal), ainsi qu'une énergie d'écho normalisée ξ définie par :

$$\xi = \frac{E_e}{E_s} \tag{8.4.2}$$

  ξ vaudra donc 1 pour tout écho issu d'un signal à écho unique. Un signal comportant deux échos de même énergie totale donnera $\xi = 0.5$ pour chacun des échos.

8.4.2 Principe de la classification

La classification par modèles de mélange Gaussien consiste à grouper les échos en supposant que chacun de leurs paramètres suit une distribution composée d'un mélange de distributions Gaussiennes. Une approche de ce type parait en effet en cohérence avec les observations réalisées précédemment (voir 7.4.4) sur les distributions des paramètres de forme (amplitude, élargissement, asymétrie). La figure 8.1 présente un jeu de données simulé à

partir d'une scène très simple composée d'un sol plan Lambertien ainsi que d'une couche de végétation homogène. On peut y voir les distributions des paramètres d'amplitude et d'élargissement. Ces distributions semblent bien composées d'une somme de distributions Gaussiennes.

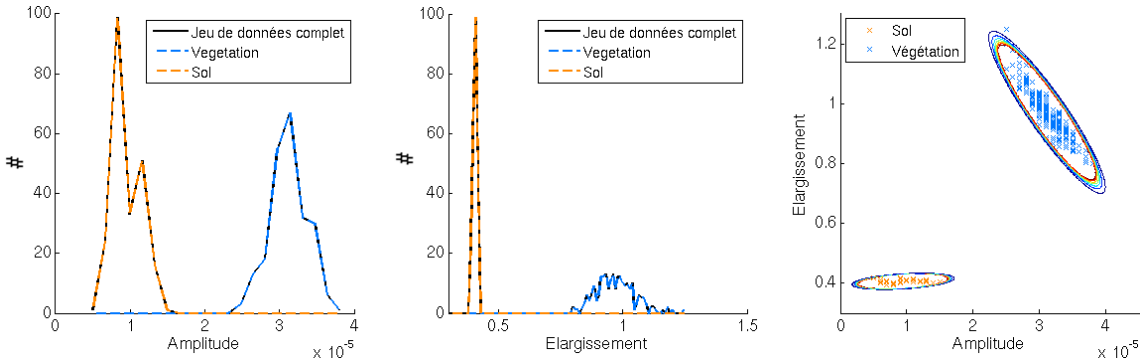


Figure 8.1 – *Exemple de classification par modèle de mélange Gaussien d'un jeu de données lidar simulé sur une scène canonique composée d'un sol plan et d'une couche de végétation homogène.*

Table 8.5 – *Matrice de confusion pour la classification par modèles de mélange Gaussien sur un jeu de données simulé à partir d'une scène de végétation simple. La classification de référence est obtenue grâce à la connaissance a priori de l'altitude $Z = 0$ du sol plan.*

	V_{ref}	S_{ref}	$p_{a\ posteriori}$
V	225	0	100.00%
S	0	225	100.00%
$p_{a\ priori}$	100.00%	100.00%	

$p_{globale}$	$\kappa_{standard}$
100.00%	1.0000

La première étape de la classification est une estimation de type « Maximum Likelihood » (maximum de vraisemblance) des paramètres des distributions Gaussiennes engagées dans la distribution des paramètres à classifier. Pour cela, l'utilisateur doit préalablement fixer le nombre de composants présentes dans le mélange de distributions Gaussiennes. L'exemple de la figure 8.1 étant très simple, nous avons pu nous contenter de 2 distributions. Cependant, dans des cas plus complexes et en présence de jeux de données plus volumineux, il sera plus efficace d'utiliser un mélange de 3 distributions afin que les points extrêmes difficilement classifiables soient placés dans la troisième classe.

Une fois les paramètres des distributions estimés, il reste à associer chaque point à une des distributions. On calcule pour cela une probabilité d'appartenance à chacune des classes afin d'associer chaque point à sa classe la plus probable. La partie de droite de la figure 8.1 présente les points classifiés dans l'espace (Amplitude, élargissement) (A, a) ainsi que les deux distributions Gaussiennes estimées par l'algorithme. Le code de couleur permet de constater que les points ont été correctement attribués à chaque classe.

Comme le montre la table 8.5, la classification par modèle de mélange Gaussien fonctionne parfaitement sur le jeu de données simple simulé à partir d'une scène comportant un sol plan et une couche de végétation homogène.

8.4.3 Résultats

Afin de réaliser les classifications de nos jeux de données, nous avons utilisé un troisième composant pour le modèle de mélange Gaussien. Ce troisième composant permet d'améliorer les classifications en s'affranchissant des points extrêmes et apparait même nécessaire pour assurer la convergence et le bon fonctionnement de l'algorithme dans certains cas. La classification fournit donc 3 classes, dont une très minoritaire dont on considère qu'elle contient les points « Inclassables ». On identifie ensuite la classe « végétation » comme celle dont l'altitude moyenne est la plus élevée. La table 8.6 montre l'effet de l'ajout d'une troisième classe pour la classification des deux jeux de données de la forêt de Järvselja et pour le jeu de données d'Amiens (zone 1). Il illustre clairement l'amélioration des classifications moyennant une perte d'information peu importante (8.8% des points jugés inclassables dans le pire des cas). Dans le cas des données simulées sur la forêt de Järvselja en visée inclinée, l'ajout de la troisième classe rend la classification possible alors qu'elle échouait avec seulement deux classes, et ce en écartant seulement 3% des points.

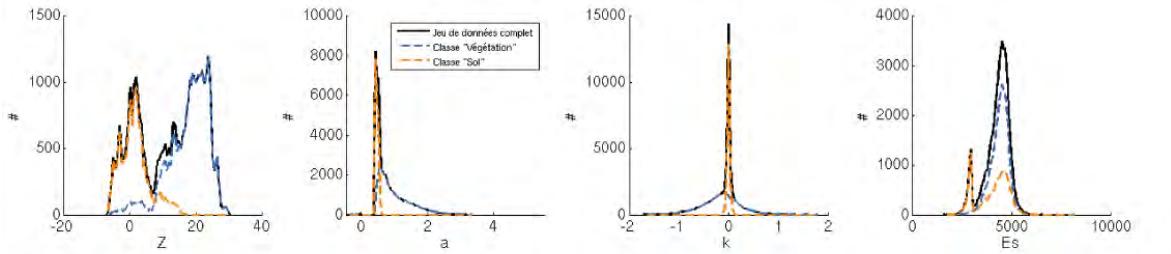
Table 8.6 – *Coefficients κ standard de Cohen obtenus en classifiant les jeux de données lidar avec les modèles de mélange Gaussien à 2 ou 3 composants. Métriques utilisées : Altitude Z, Amplitude des échos A, élargissement des échos a et facteur d'asymétrie k.*

	2 composants	3 composants	% inclassables
Järvselja (visée inclinée)	0.1	0.78	3.0%
Järvselja (visée nadir)	0.81	0.94	2.3%
Amiens (zone 1)	0.74	0.84	8.8%

Nous avons alors mis en place un test systématique des résultats de classification sur les quatre jeux de données de référence (les deux jeux de données acquis sur Amiens par l'IGN, et deux jeux de données simulés avec DELiS sur la forêt de Järvselja pour deux angles de visée différents). Grâce au test systématique de toutes les combinaisons de métriques possibles, nous avons pu déterminer la combinaison de métriques optimale (au sens du κ) pour la classification de chaque jeu de données.

Les figures 8.2, 8.3, 8.4 et 8.5 montrent les résultats obtenus en classifiant chaque jeu de données avec la combinaison de métriques donnant le meilleur résultat (au sens de κ). On constate que les paramètres les plus utiles à la classification semblent être l'élargissement des échos a, l'altitude Z des points 3D et un paramètre d'énergie. Le rôle de Z apparait prédominant de manière naturelle, en raison de la stratification des scènes. Dans les cas de la Zone 2 du jeu de données d'Amiens, il est même possible de séparer les échos lidar en trois classes (sol, batiments, végétation) en utilisant deux paramètres uniquement.

La figure 8.2 illustrant la classification du jeu de données simulé en visée inclinée permet d'anticiper un problème futur. On constate en effet sur la visualisation du nuage de points 3D de nombreux points classifiés à tort comme appartenant au sol. Ces points semblent être alignés suivant des droites verticales, ce qui conduit à penser qu'il s'agit du tronc des arbres. Comme nous le verrons par la suite, la présence de ces erreurs de classification pourra s'avérer problématique pour la reconstructions de la géométrie du terrain, il pourrait par contre être intéressant d'exploiter ces données pour, par exemple, détecter et compter les arbres



GMM \ Référence	Végétation	Sol	précision a posteriori
Végétation	35198	1379	96.23%
Sol	3898	15454	79.86%
précision a priori	90.03%	91.81%	κ=0.78

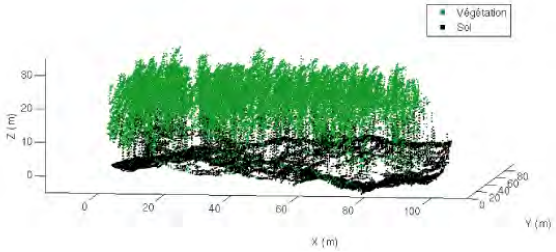
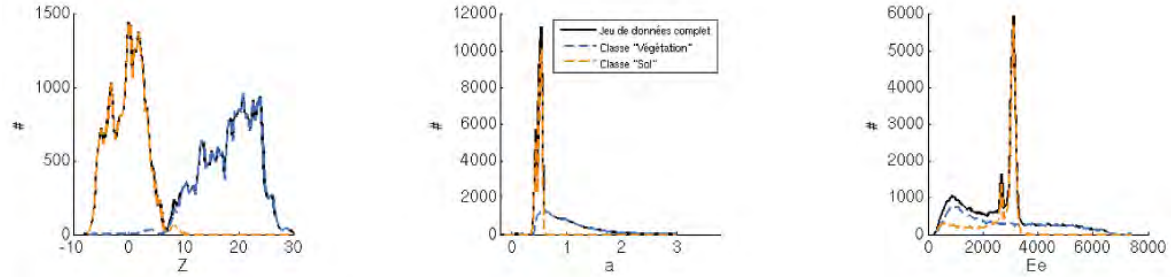


Figure 8.2 – *Classification optimale du jeu de données simulé sur la forêt de Järvselja (visée inclinée +30°) grâce aux modèles de mélange Gaussien avec la combinaison de métriques (Z, a, k, E_s). En haut, distributions classifiées des paramètres utilisés : altitude Z, élargissement a, asymétrie k et énergie du signal complet E_s. En bas, matrice de confusion et nuage de points 3D classifié.*



GMM \ Référence	Végétation	Sol	précision a posteriori
Végétation	26891	81	99.70%
Sol	244	25966	99.07%
précision a priori	99.10%	99.69%	κ = 0.99

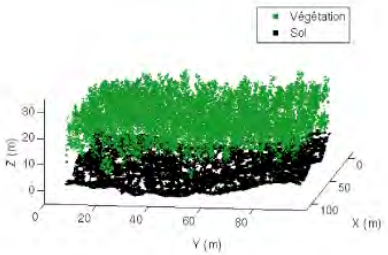
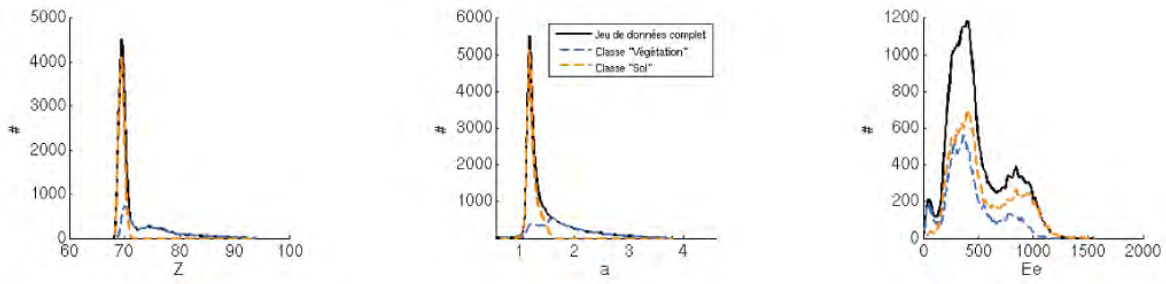


Figure 8.3 – *Classification optimale du jeu de données simulé sur la forêt de Järvselja (visée nadir) grâce aux modèles de mélange Gaussien avec la combinaison de métriques (Z, a, E_e). En haut, distributions classifiées des paramètres utilisés : altitude Z, élargissement a et énergie de l'écho E_e. En bas, matrice de confusion et nuage de points 3D classifié.*

d'une forêt.



GMM \ Référence	Végétation	Sol	précision a posteriori
Végétation	11047	2391	82.21%
Sol	2153	17288	88.93%
précision a priori	86.18%	87.85%	κ=0.71

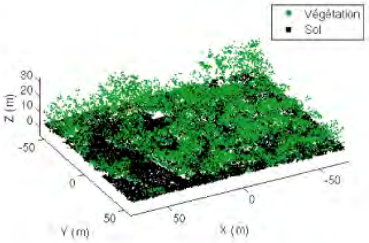


Figure 8.4 – *Classification optimale du jeu de données d'Amiens, Zone 1 grâce aux modèles de mélange Gaussien avec la combinaison de métriques* (Z, a, E_e)*. En haut, distributions classifiées des paramètres utilisés : altitude* Z*, élargissement* a *et énergie de l'écho* E_e*. En bas, matrice de confusion et nuage de points 3D classifié.*

GMM \ Référence	Végétation	Sol	Bâtiments	précision a posteriori
Végétation	2811	361	456	77.48%
Sol	545	10985	170	93.89%
Bâtiments	2306	503	5282	65.28%
précision a priori	49.65%	92.71%	89.40%	κ=0.70

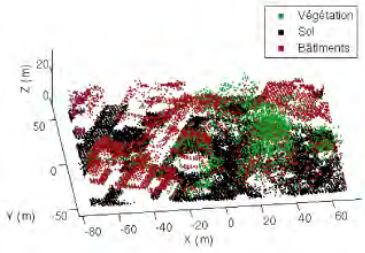


Figure 8.5 – *Classification optimale du jeu de données d'Amiens, Zone 2 grâce aux modèles de mélange Gaussien avec la combinaison de métriques* (Z, a)*. En haut, distributions classifiées des paramètres utilisés : altitude* Z *et élargissement* a*. En bas, matrice de confusion et nuage de points 3D classifié.*

8.5 Correction grâce à la méthode « dernier écho »

Comme nous l'avons vu dans la section 8.3, l'identification d'un écho lidar comme n'étant pas un dernier écho permet de le classifier comme un écho de végétation avec une très bonne fiabilité. Il est donc tentant d'exploiter cette information pour améliorer les classifications fournies par les modèles de mélange Gaussien. La méthode de correction simple des classifications que nous avons mise en place consiste à vérifier que tous les échos ayant été étiquettés « Sol » par le classifieur sont des derniers échos. Dans le cas contraire, il est très probable que l'écho en question ait été placé dans la classe « Sol » à tort, et nous le déplaçons vers la classe « Végétation ».

La table 8.7 montre les performances de la classification du jeu de données simulé de la forêt de Järvselja en visée oblique avant et après correction. Comme nous pouvions nous y attendre, en opérant un transfert des échos classifiés à tort comme sol vers les échos bien classifiés comme végétation, la correction permet d'améliorer efficacement, dans ce cas, la précision a posteriori de la classification pour la classe « Sol ». Dans d'autres cas, il se peut que la correction soit moins efficace, mais dans le contexte forestier et en milieu naturel, il apparait peu probable qu'elle dégrade la classification. Nous avons en effet vu que ce sont les bords de bâtiments qui sont la source d'erreur principale de la classification « dernier écho ». Dans le cadre de notre étude, la présence de bâtiments est peu probable, c'est pourquoi nous utiliserons systématiquement cette correction par la suite.

Table 8.7 – *Matrices de confusion pour la classification du jeu de données simulé sur la forêt de Järvselja avec incidence* 30°. *Classification utilisant la combinaison de métriques* (Z, a, k, E_s) *sans correction (en haut) et avec correction (en bas).*

Avant correction

GMM \ Référence	Végétation	Sol	précision a posteriori
Végétation	35198	1379	96.23%
Sol	3898	15454	79.86%
précision a priori	90.03%	91.81%	κ=0.78

Après correction

GMM \ Référence	Végétation	Sol	précision a posteriori
Végétation	38778	1379	96.57%
Sol	320	15454	97.97%
précision a priori	99.18%	91.81%	κ=0.99

+ 3578

Notons enfin que cette méthode de classification est plus difficilement applicable à une classification en trois classes comme celle qui est réalisée sur la zone semi-urbaine d'Amiens (zone 2). Néanmoins, des adaptations peuvent être formulées selon l'objectif final de la classification.

8.6 Choix d'une classification pour la suite

Les résultats énoncés précédemment ne nous ont pas réellement permis de conclure sur la meilleure combinaison de métriques à utiliser pour le traitement d'un jeu de données quelconque. Pour tenter d'apporter une réponse à ce problème, nous avons testé toutes les combinaisons à 2, 3, 4 ou 5 métriques possibles sur chacun des jeux de données, et conservé les cinq combinaisons permettant d'atteindre les meilleures performances (au sens de κ) d'un point de vue global. La figure 8.6 montre les valeurs obtenues pour le κ standard ainsi que pour la précision globale pour les cinq combinaisons de métriques qui offrent le meilleur κ moyen.

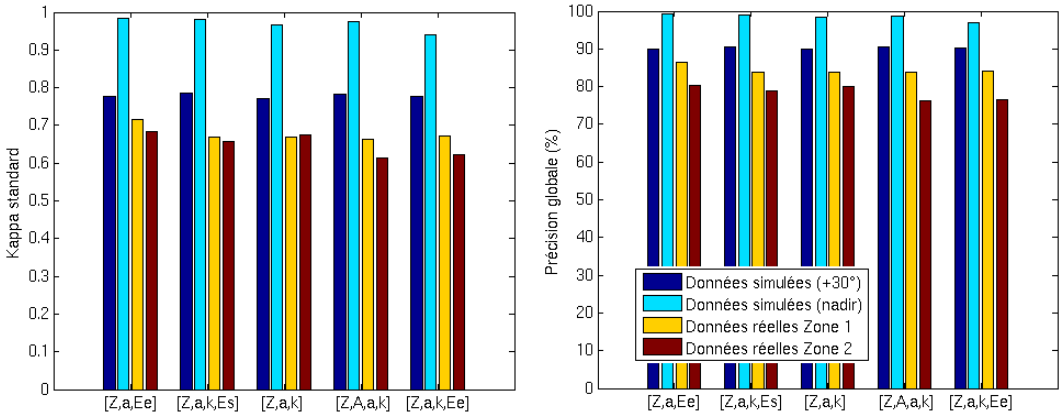


Figure 8.6 – *Performances globales des cinq meilleures combinaisons de métriques pour les 4 jeux de données test. κ standard (à gauche) et précision globale (à droite).*

On constate tout d'abord que les meilleures combinaisons de métriques utilisent au maximum quatre paramètres, et que souvent, trois suffisent. D'autre part, les cinq combinaisons présentées sur la figure 8.6 fournissent des classifications de qualité équivalente. Afin de les départager et de choisir celle que nous allons utiliser par la suite, revenons à l'objectif premier de la classification : séparer les points issus du sol des échos de végétation afin de reconstruire la géométrie du terrain situé sous le feuillage. Deux aspects importants apparaissent donc :

- Afin de garantir une meilleure **précision** de la reconstruction finale, il nous faut minimiser le nombre d'échos de végétation identifiés à tort comme des échos de sol.
- D'autre part, plus le nombre de points identifiés comme des échos de sol est important, plus la **résolution** de la reconstruction finale pourra être fine.

Ces considérations nous poussent à maximiser, non plus la précision globale ou le κ standard, mais plutôt les précisions a priori et a posteriori pour la classe « Sol ». Une bonne précision a posteriori signifie une bonne fiabilité de la classification, et ainsi une meilleure précision de la reconstruction. Une meilleure précision a priori indique qu'un plus grand nombre des points effectivement « Sol » ont été repérés dans le processus de classification.

La figure 8.7 résume les performances en termes de précisions a priori et a posteriori des cinq combinaisons précédentes, pour les quatre jeux de données test. Une fois de plus, il apparait difficile de trancher en faveur de l'une ou l'autre des combinaisons, même si la combinaison (Z, a, E_e) se différencie légèrement par une meilleure précision a priori, avec une précision a posteriori très légèrement inférieure.

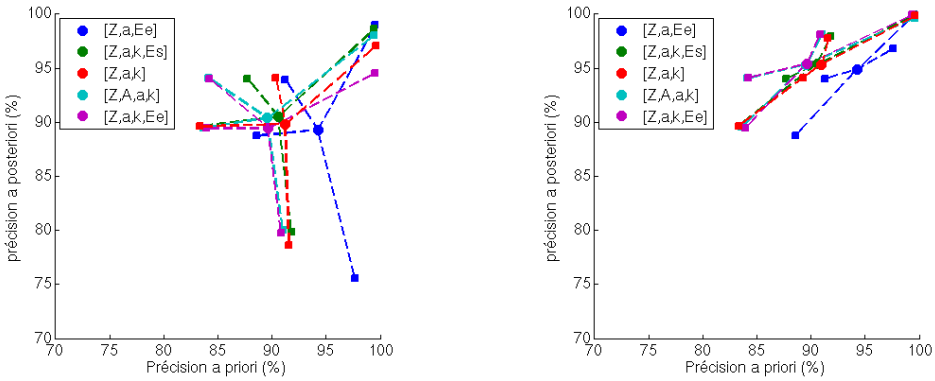


Figure 8.7 – *Précisions a priori et a posteriori des cinq meilleures classifications pour les quatre jeux de données. Les points indiquent les précisions moyennes, les carrés donnent les quatre valeurs correspondant aux quatre jeux de données. Classifications non corrigées (à gauche) et corrigées (à droite).*

Par la suite, et en l'absence d'éléments supplémentaires permettant de choisir, nous utiliserons la combinaison de métriques (Z, A, a, k), ou (A, a, k) lorsque les conditions ne permettent pas une utilisation profitable de la variable Z. Cette combinaison de métriques possède l'avantage de n'utiliser que la position verticale Z et les paramètres issus de la modélisation par Gaussiennes généralisées alors que (Z, a, E_s), (Z, a, k, E_e) ou (Z, a, k, E_s) nécessitent une extraction supplémentaire de données.

8.7 Conclusion

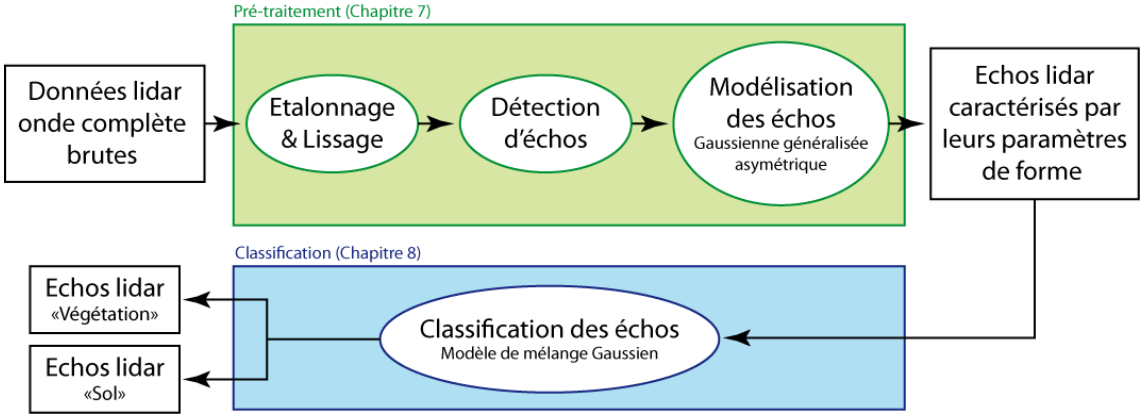


Figure 8.8 – *Schéma de principe reprenant la démarche de traitement des données lidar onde complète depuis leur forme brute jusqu'à la séparation des échos lidar en deux classes « végétation » et « sol ».*

Dans ce chapitre, nous avons mis en place une méthode de classification non supervisée par modèles de mélange Gaussien. Cette classification nous a permis de séparer de façon satisfaisante les échos lidar provenant du sol de ceux provenant de la végétation (coefficients κ de Cohen supérieurs à 0.7). Les tests réalisés grâce à quatre jeux de données test, en

milieu forestier et urbain, réels et simulés, nous ont permis de dégager les configurations optimales pour la classification des jeux de données lidar onde complète en deux grandes classes « Sol » et « Végétation ».

Les méthodes de classification les plus efficaces utilisent le paramètre d'altitude Z des échos, ainsi que leur élargissement a, leur asymétrie k et un quatrième paramètre caractéristique de l'amplitude ou de l'énergie de l'écho. Dans les parties qui vont suivre, nous utiliserons pour la classification des données un modèle de mélange Gaussien à 3 composants et utilisant la combinaison de métriques (Z, A, a, k) (altitude, amplitude, élargissement et asymétrie des échos).

Une méthode de correction utilisant l'information « dernier écho »a également été mise en place afin d'améliorer la précision a posteriori des classifications pour la classe « Sol ». Cette méthode produit des résultats inégaux suivant les jeux de données, mais résulte toujours en une amélioration de la classification. Nous l'utiliserons donc également systématiquement par la suite.

La chaîne de traitement mise en place (schématisée sur la figure 8.8) nous permet maintenant de nous intéresser à la reconstruction de la géométrie du terrain à partir des échos lidar identifiés comme provenant du sol.

Chapitre 9

Reconstruction de MNT sous couvert végétal

Sommaire

9.1 Introduction 139
9.2 Méthode de reconstruction 140
9.2.1 Projection du nuage de points sur une grille régulière 140
9.2.2 Estimation de l'altitude du sol dans une case de la grille 140
9.2.3 Reconstruction du MNT 142
9.3 Résultats et sensibilité 142
9.3.1 Evaluation des différentes méthodes d'estimation de l'altitude du sol 143
9.3.2 Impact du choix de la résolution 145
9.3.3 Impact de l'angle de visée 147
9.3.4 Synthèse 150
9.4 Amélioration des performances 150
9.4.1 Correction de la classification 152
9.4.2 Correction des reconstructions 154
9.5 Synthèse 155
9.6 Combinaison de visées multi-angulaires 159
9.6.1 Introduction 159
9.6.2 Simulations 159
9.6.3 Combinaison des visées 160
9.6.4 Recherche de la visée optimale 162
9.7 Conclusion 166

9.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est la reconstruction d'un modèle numérique de terrain (MNT) situé sous un couvert végétal. De nombreuses études ayant déjà été réalisées dans ce but, nous ne chercherons pas ici à proposer une technique nouvelle de reconstruction. Nous nous baserons au contraire sur une méthode très simple de construction d'une carte de hauteur (heightmap) pour la production d'un MNT à partir d'un jeu de données lidar onde complète, préalablement séparé en échos et classifié selon les techniques présentées dans les chapitres précédents.

Une fois cette méthode mise en place, nous évaluerons sa précision en tirant parti de notre outil de simulation pour disposer d'un jeu de données lidar aéroporté ainsi que d'une

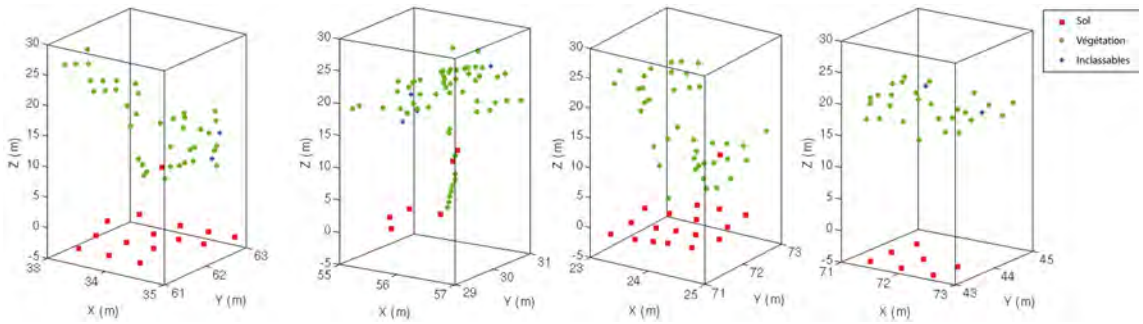


Figure 9.1 – *Exemples de sous ensembles issus de la projection du jeu de données simulé sur la forêt de Järvselja (incidence* 30°*) sur une grille régulière de résolution* $r = 2m$*.*

vérité terrain parfaite lui correspondant. Nous pourrons alors aborder le cœur du sujet, la combinaison de visées multi-angulaires pour l'amélioration des reconstructions. Toujours grâce à la simulation, nous pourrons évaluer l'apport d'une méthode simple de combinaison de jeux de données. Nous proposerons alors une technique d'optimisation de la reconstruction d'une zone précise grâce à la détermination de la direction optimale d'observation.

Dans cette partie, nous utilisons donc exclusivement des données simulées avec DELiS et la forêt de Järvselja présentée dans le chapitre 5.

9.2 Méthode de reconstruction

La méthode la plus couramment utilisée pour construire un modèle numérique de terrain à partir d'un nuage de points 3D est la technique dite du « raster ». Cette méthode consiste à définir une grille généralement horizontale et régulière, et à découper le nuage de points selon cette grille. On détermine alors, pour chaque case de la grille, une valeur de l'altitude à partir des points contenus dans la case.

9.2.1 Projection du nuage de points sur une grille régulière

Supposons que la grille $\mathcal{G}$ de dimension $N \times N$ soit choisie sur le plan $Z = 0$ et de résolution (dX, dY). Projeter le nuage de points $\mathcal{P}$ sur la grille $\mathcal{G}$ revient à découper $\mathcal{P}$ en sous ensembles $\mathcal{P}_{i,j}$ définis par :

$$\mathcal{P}_{i,j} = \{P(x, y, z) \in \mathcal{P} \text{ tels que } |x - X_i| \leq dX \text{ et } |y - Y_i| \leq dY\} \tag{9.2.1}$$

La figure 9.1 montre quelques exemples de sous ensembles $\mathcal{P}_{i,j}$ issus de la projection d'un jeu de données simulé sur la forêt de Järvselja sur une grille de résolution $r = 2m$. Chaque point est localisé dans l'espace, et est assorti d'une série de grandeurs telles que les paramètres de forme de l'écho (voir section 7.3.3), d'autres paramètres extraits de l'écho original (énergie totale, longueur totale, etc...), ainsi que d'un étiquetage fourni par la classification présentée dans le chapitre 8.

9.2.2 Estimation de l'altitude du sol dans une case de la grille

Une fois cette opération réalisée, on obtient pour chaque case (X_i, Y_j) un sous ensemble $\mathcal{P}_{i,j}$ du nuage de points initial à partir duquel nous allons extraire les informations permettant

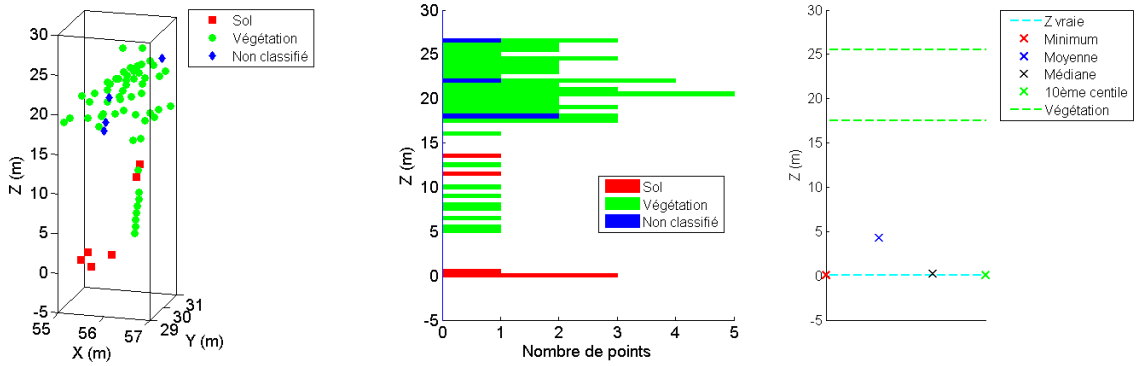


Figure 9.2 – *Exemple d'estimation de l'altitude du sol pour une case d'une grille régulière de résolution $r = 2m$ (jeu de données simulé sur la forêt de Järvselja avec une visée inclinée de 30°). De gauche à droite : points 3D et leur classification, histogramme du nombre de points selon la verticale (par tranche de $0.5m$), comparaison des différentes mesures de l'altitude du sol à la valeur de référence.*

de reconstruire la géométrie de la scène. Pour ce faire, nous nous concentrerons ici sur la mesure de trois grandeurs :

- L'altitude du sol ;
- La hauteur du sommet de la végétation ;
- La hauteur du bas de la végétation.

Le principe de reconstruction de la scène suivant une grille régulière implique ici l'hypothèse d'invariance des grandeurs mesurées à l'intérieur d'une case. En d'autres termes, nous estimerons une valeur unique par case pour chacune des grandeurs considérées. La résolution de la reconstruction ainsi produite dépend donc uniquement de la définition initiale de la grille.

Afin d'estimer une valeur pour l'altitude du sol $Z_{sol}(X_i, Y_j)$ à partir des points étiquetés « Sol » dans $\mathcal{P}_{i,j}$, différents choix sont possibles :

- Le minimum des altitudes des points de $\mathcal{P}_{i,j}$. Cette méthode permet par exemple d'estimer la hauteur du sol lorsque l'on soupçonne qu'il reste des points liés à des échos de végétation parmi les points classifiés « sol ».
- La moyenne des altitudes des points de $\mathcal{P}_{i,j}$ est souvent utilisée lorsque l'information provenant de chaque point du sous ensemble $\mathcal{P}_{i,j}$ est jugée de qualité identique.
- L'altitude médiane permet de s'affranchir d'éventuels points extrêmes absurdes.
- Le dixième centile reprend la même idée en s'affranchissant majoritairement des points les plus élevés qui pourraient correspondre à des erreurs de classification.

La figure 9.2 montre un exemple d'estimation de l'altitude pour une case de $2m$ de coté sur le jeu de données simulé avec un angle de visée de 30° (par rapport à la verticale). On y voit quatre échos lidar provenant du sol et bien classifiés, 2 échos classifiés comme sol alors qu'ils proviennent vraisemblablement du tronc d'un arbre, et toute une série d'échos de végétation. L'histogramme permet d'apprécier la distribution verticale des échos des différentes classes. Dans cet exemple, la mesure de l'altitude basée sur la hauteur moyenne des points de sol est biaisée par la mauvaise classification de deux des échos. En revanche, cette erreur de classification n'impacte pas les estimations réalisées en considérant l'altitude minimale, l'altitude médiane ou le dixième centile.

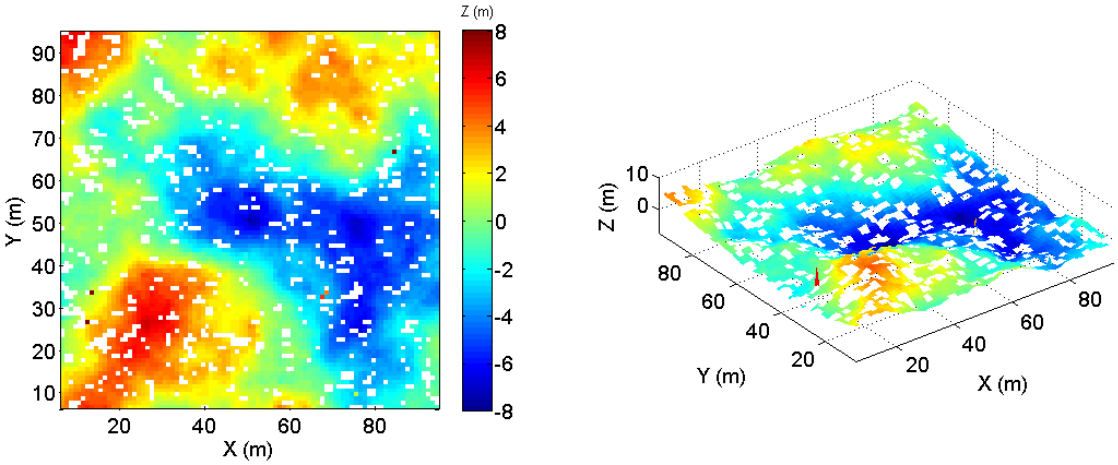


Figure 9.3 – *Reconstruction du MNT sous couvert végétal à partir du jeu de données simulé en visée nadir sur la forêt de Järvselja pour une résolution de* 1m.

Sur cette figure, nous présentons également un exemple d'estimation de la hauteur et de l'épaisseur de la canopée. L'altitude du haut de la canopée a été obtenue grâce au 90ème centile des altitudes des points de végétation, et la hauteur du bas de canopée grâce au 20ème centile.

9.2.3 Reconstruction du MNT

En répétant l'opération d'estimation de l'altitude du sol pour chaque case de la grille, on obtient une carte des hauteurs représentant le modèle numérique de terrain situé sous le couvert végétal. La figure 9.3 montre le résultat d'une telle reconstruction obtenue à partir du jeu de données simulé en visée nadir sur la forêt de Järvselja.

A ce stade de la reconstruction, il subsiste quelques cases pour lesquelles, faute de points 3D étiquetés « sol », aucune estimation de l'altitude de sol n'a été réalisée. Afin de combler ces lacunes, on procède à une interpolation des altitudes manquantes. Le résultat de cette interpolation est illustré sur la figure 9.4.

Sur cet exemple de reconstruction, on peut remarquer la présence de quelques points aberrants (points rouges sur la figure 9.3) donnant lieu à des erreurs d'autant plus importantes après interpolation. Il s'agit là de points 3D pour lesquels la classification est erronée. Il s'agit en fait de cases pour lesquelles un nombre proportionnellement significatif d'échos de végétation on été classifiés comme échos de sol. Ils induisent une forte sur-estimation de l'altitude du sol. Nous reviendrons sur ce phénomène par la suite.

9.3 Résultats et sensibilité

Grâce à la connaissance du modèle numérique de terrain utilisé pour la modélisation de la scène, il nous est possible de comparer les reconstructions réalisées à une vérité terrain parfaite. Nous pouvons alors évaluer les performances de la méthode de reconstruction pour les différentes méthodes d'estimation de l'altitude du sol, à différentes résolutions et pour différents angles de visée.

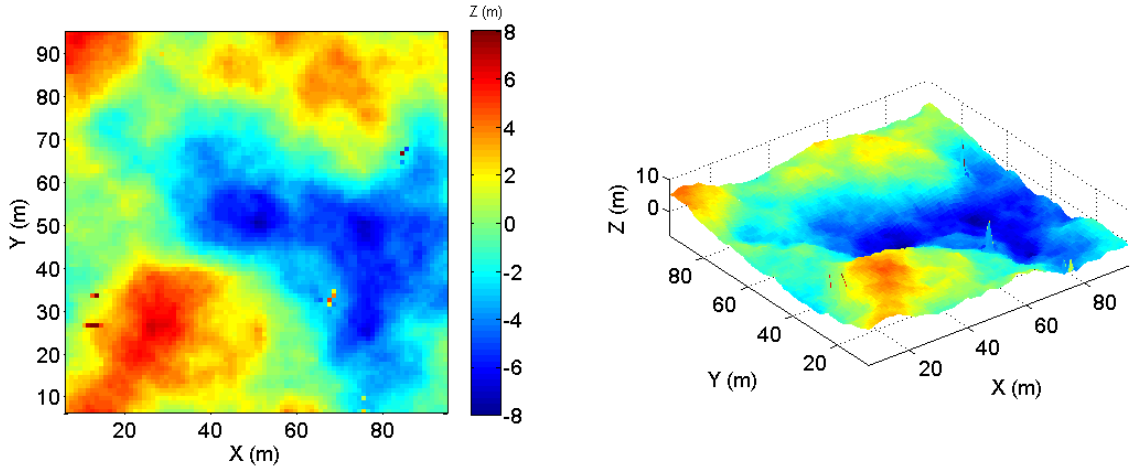


Figure 9.4 – *Reconstruction du MNT sous couvert végétal à partir du jeu de données simulé en visée nadir sur la forêt de Järvselja pour une résolution de* 1m*, après interpolation des valeurs manquantes de la figure 9.3.*

9.3.1 Evaluation des différentes méthodes d'estimation de l'altitude du sol

Nous réalisons ici la reconstruction du MNT avec une résolution de 1m pour le jeu de données simulé en incidence normale en utilisant successivement les quatre méthodes décrites précédemment pour l'estimation de l'altitude du sol. La comparaison de la surface obtenue au MNT de référence permet de visualiser les distributions des erreurs absolues réalisées. Ces erreurs sont calculées comme :

$$\Delta Z = Z_{reconstruction} - Z_{reference} \tag{9.3.1}$$

Les distributions de l'erreur absolue sont représentées sur la figure 9.5. Cette figure permet de constater deux types de comportements différents. D'une part, les estimations de l'altitude du sol par les méthodes du minimum et du dixième centile qui sont à l'origine d'une sous-estimation globale (erreurs moyennes respectives de -0.17m et -0.15m) , et d'autre part les estimations par les méthodes de la moyenne et de la médiane qui donnent une distribution d'erreur centrée (erreur moyenne de -0.05m pour les deux méthodes).

A ce stade, il apparait important de souligner que l'erreur dans l'estimation de l'altitude réalisée pendant le processus de reconstruction n'est pas inhérente au jeu de données lidar, mais plutôt à la supposition qui a été faite que l'altitude du sol est constante à l'intérieur des cases, ainsi qu'au fait que l'estimation réalisée a été comparée à la valeur vraie de l'altitude du sol au centre de la case. A ce titre, la figure 9.6 montre la distribution des erreurs de mesure de la position du sol par la mesure lidar brute. Cette distribution a été obtenue en comparant, pour chaque écho classifié comme écho de sol, la mesure lidar pour la hauteur du sol à la hauteur réelle du MNT à la même position (X, Y). On remarque une distribution des erreurs centrée et plus fine, ainsi que quelques points surestimant très largement la hauteur du sol (erreur supérieure à 1.5m). Ces points sont ceux qui ont été mal classifiés. Il est intéressant de noter que ces quelques points ne se retrouvent pas en aussi grand nombre dans les distributions des erreurs de reconstruction. Leur importance a été amoindrie car l'estimation de l'altitude du sol à l'intérieur d'une case combine les mesures issues de tous les échos de sol qu'elle contient.

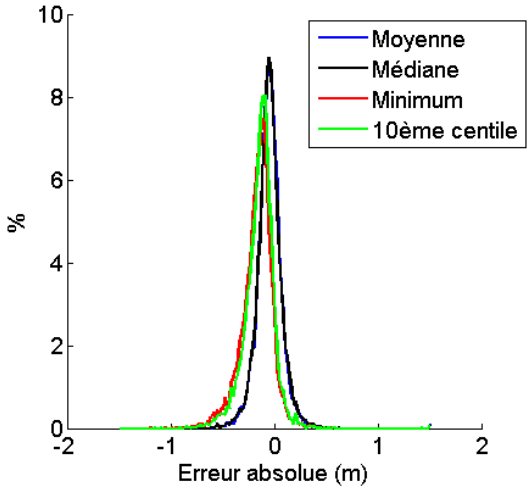


Figure 9.5 – *Distribution des erreurs pour la reconstruction du MNT à partir du jeu de données simulé en visée nadir sur la forêt de Järvselja pour une résolution de* 1m. *Impact de la méthode utilisée pour l'estimation de l'altitude du sol (les distributions pour les méthodes de la moyenne et de la médiane sont superposées).*

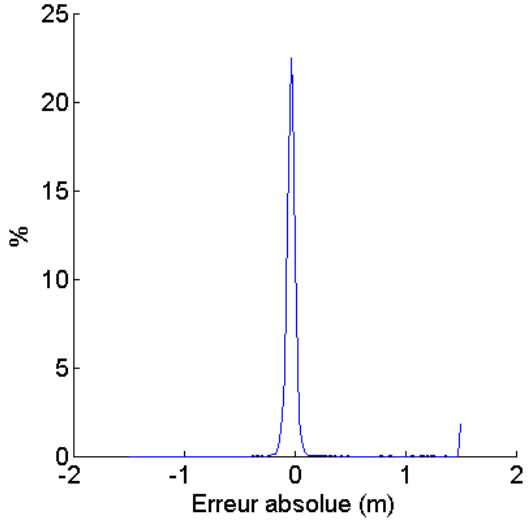


Figure 9.6 – *Distribution des erreurs de mesure de l'altitude du sol inhérentes aux échos lidar individuels pour le jeu de données simulé en visée nadir sur la forêt de Järvselja*

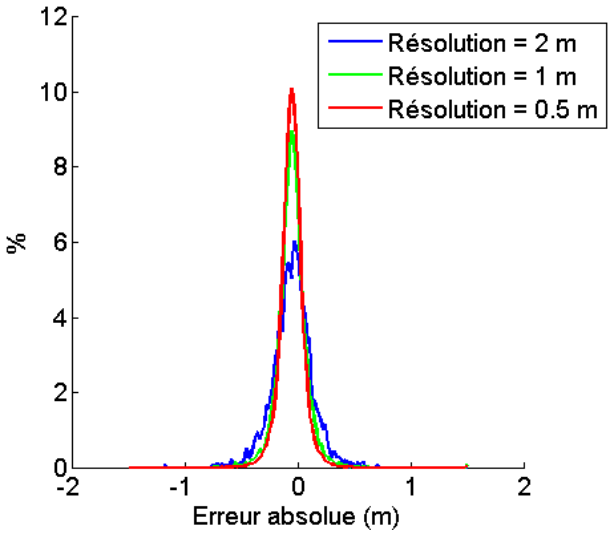


Figure 9.7 – *Distribution des erreurs de reconstruction du MNT pour le jeu de données simulé en visée nadir sur la forêt de Järvselja pour différentes résolution de la grille. Altitude du sol estimée par la méthode de la médiane.*

Au vu des résultats de la figure 9.5, il apparait difficile de conclure sur la meilleure des méthodes d'estimation de l'altitude à adopter par la suite. Il parait probable que l'utilisation de l'altitude moyenne pose problème dans le cas où les points de sols sont peu nombreux et où une erreur de classification est plus probable. L'utilisation de la valeur médiane peut remédier à ce problème dans la mesure où les points mal classifiés restent en minorité. Dès lors que les erreurs de classification sont plus probables, par exemple en présence de végétation basse, on préfèrera utiliser la méthode du dixième centile, qui est plus robuste aux points aberrants que celle de l'altitude minimale. Par la suite, nous estimerons l'altitude du sol par la valeur médiane, tout en gardant à l'esprit qu'une autre méthode peut s'avérer plus pertinente selon les situations. De même, il pourrait s'avérer pertinent d'utiliser un autre centile que le dixième.

9.3.2 Impact du choix de la résolution

Mis à part le choix de la méthode d'estimation de l'altitude du sol, le paramètre le plus déterminant dans le processus de reconstruction semble être la résolution de la grille initiale. Plus la résolution sera fine, plus la dimension des détails visibles sur la reconstruction du MNT sera petite. On peut donc imaginer avoir tout intérêt à utiliser une résolution la plus fine possible. Cependant, l'augmentation de la résolution a plusieurs effets négatifs sur la reconstruction. Tout d'abord, plus la grille est fine, plus le nombre d'échos lidar provenant du sol à l'intérieur de chaque case sera faible. Cela conduira nécessairement à une plus grande incertitude sur l'estimation de l'altitude et du même coup à un plus grand nombre de cases dépourvues de mesures pour l'altitude du sol. Ceci impliquera de plus importantes interpolations, et donc plus d'erreurs.

Pourtant, la figure 9.7 montre qu'une résolution plus fine donne une meilleure précision de la reconstruction. Cet effet s'explique par le phénomène de biais dans la comparaison au MNT de référence. Plus la résolution est fine, moins l'estimation de l'altitude réalisée dans les cases est éloignée de la valeur prise par l'altitude de référence au centre de la case.

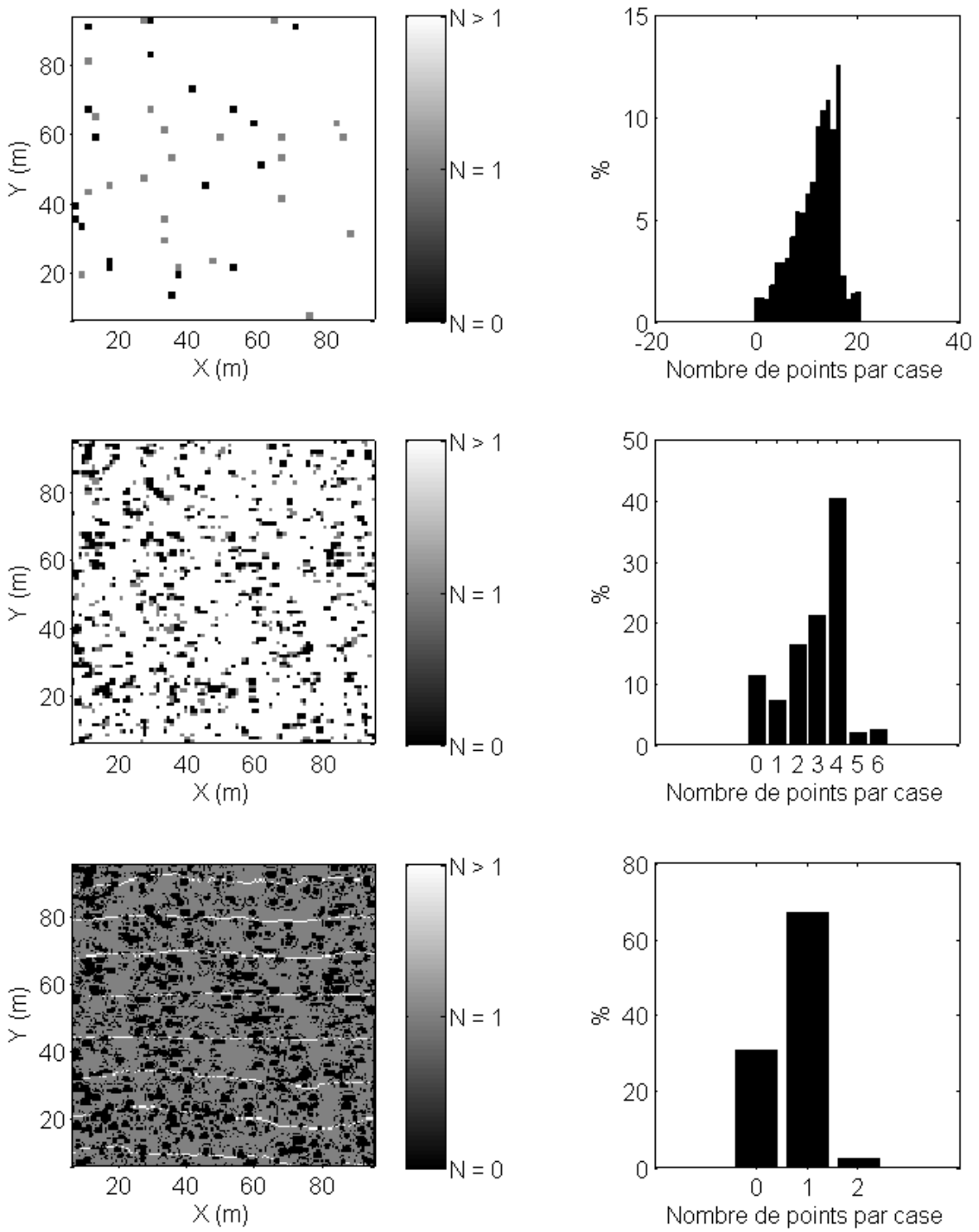


Figure 9.8 – *Statistiques de couverture de la zone reconstruite en fonction de la résolution de la grille. Jeu de données simulé en visée nadir sur la forêt de Järvselja. De haut en bas, résolution de* 2m, 1m *et* 0.5m. *A gauche, carte indiquant les cases possédant plus d'un écho de sol (en blanc), exactement un écho de sol (en gris) et ne possédant aucun écho de sol (en noir). A droite, distribution du nombre d'échos de sol par case.*

Table 9.1 – *Erreurs quadratiques moyennes avant et après interpolation des valeurs manquantes pour les reconstructions à trois résolutions différentes. Jeu de données simulé en visée nadir sur la forêt de Järvselja.*

	résolution = 2m	résolution = 1m	résolution = 0.5m
Avant interpolation	0.18m	0.26m	0.20m
Après interpolation	0.18m	0.29m	0.35m

La figure 9.8 illustre la contrepartie à la finesse de la grille : une nette diminution du nombre de points par case lorsque le pas de grille diminue. Avec un pas de 2m, 99% des cases possèdent au moins un écho classifié « sol », et 99% des cases possédant au moins un écho de sol en possèdent en fait plusieurs. Lorsque le pas de grille diminue, ces chiffres se dégradent et l'on obtient, pour un pas de grille de 1m, 89% des cases avec au moins un écho de sol. Pour le pas de grille le plus fin (0.5m), on ne trouve plus que 69% des cases avec au moins un écho de sol, et surtout, 96% des cases possédant un écho de sol en possèdent un seul.

La figure 9.9 montre les reconstructions aux trois résolutions ainsi que les résultats obtenus après interpolation. On constate visuellement un résultat de qualité proche pour les trois résolutions, exception faite des quelques points de mesure aberrants aux résolutions les plus fines. Ces mesures fausses, et l'erreur d'interpolation qui en découle, sont probablement dues à une mauvaise classification de quelques échos lidar.

La table 9.1 donne pour ces trois reconstructions les erreurs quadratiques moyennes obtenues. On y constate naturellement que le processus d'interpolation n'a pas d'impact pour la résolution de 2m, puisque la quasi-totalité des mesures sont présentes. La résolution la plus fine présentait par contre l'erreur quadratique moyenne la plus faible avant la phase d'interpolation. Suite à l'interpolation, cette erreur devient la plus importante. On constate de manière générale et naturelle que plus le nombre de valeurs manquantes est grand, plus l'interpolation introduit une erreur importante.

9.3.3 Impact de l'angle de visée

La simulation de l'observation de la forêt de Järvselja sous deux angles de visée différents permet d'évaluer l'impact de cette caractéristique sur la reconstruction du MNT.

La figure 9.10 montre les deux reconstructions obtenues pour les deux visées. On remarque deux effets liés à l'inclinaison de la visée. Tout d'abord un plus grand nombre de mesures manquantes : 89% de couverture pour la visée nadir, contre 67% pour la visée inclinée. L'inclinaison des lignes de visées est à l'origine d'un effet double : d'une part l'épaisseur équivalente de végétation traversée est susceptible d'augmenter, et d'autre part l'incidence inclinée sur le sol provoque une décroissance de l'intensité lumineuse rétrodiffusée. Ce sont ces deux effets, combinés à un impact plus important des troncs et branchages, qui n'étaient quasiment pas visibles en visée nadir, qui sont à l'origine de la diminution de la quantité d'échos de sol disponibles.

La figure 9.11 montre les distributions d'erreurs obtenues. On y constate que les distributions obtenues sont très similaires, à ceci près que la reconstruction avec les visées inclinées comporte de nombreuses erreurs supérieures à $1.5m$. Il s'agit là d'un autre effet négatif de l'inclinaison des lignes de visées pour l'estimation de l'altitude du sol en observation monoangulaire : l'observation plus importante des troncs d'arbres et des branchages produit de nombreux échos dont les caractéristiques se rapprochent de celles des échos de sol, mais provenant toutefois de la végétation. Quelques uns de ces échos sont classés à tort comme échos de sol, ce qui produit d'importantes erreurs d'estimation de l'altitude du sol.

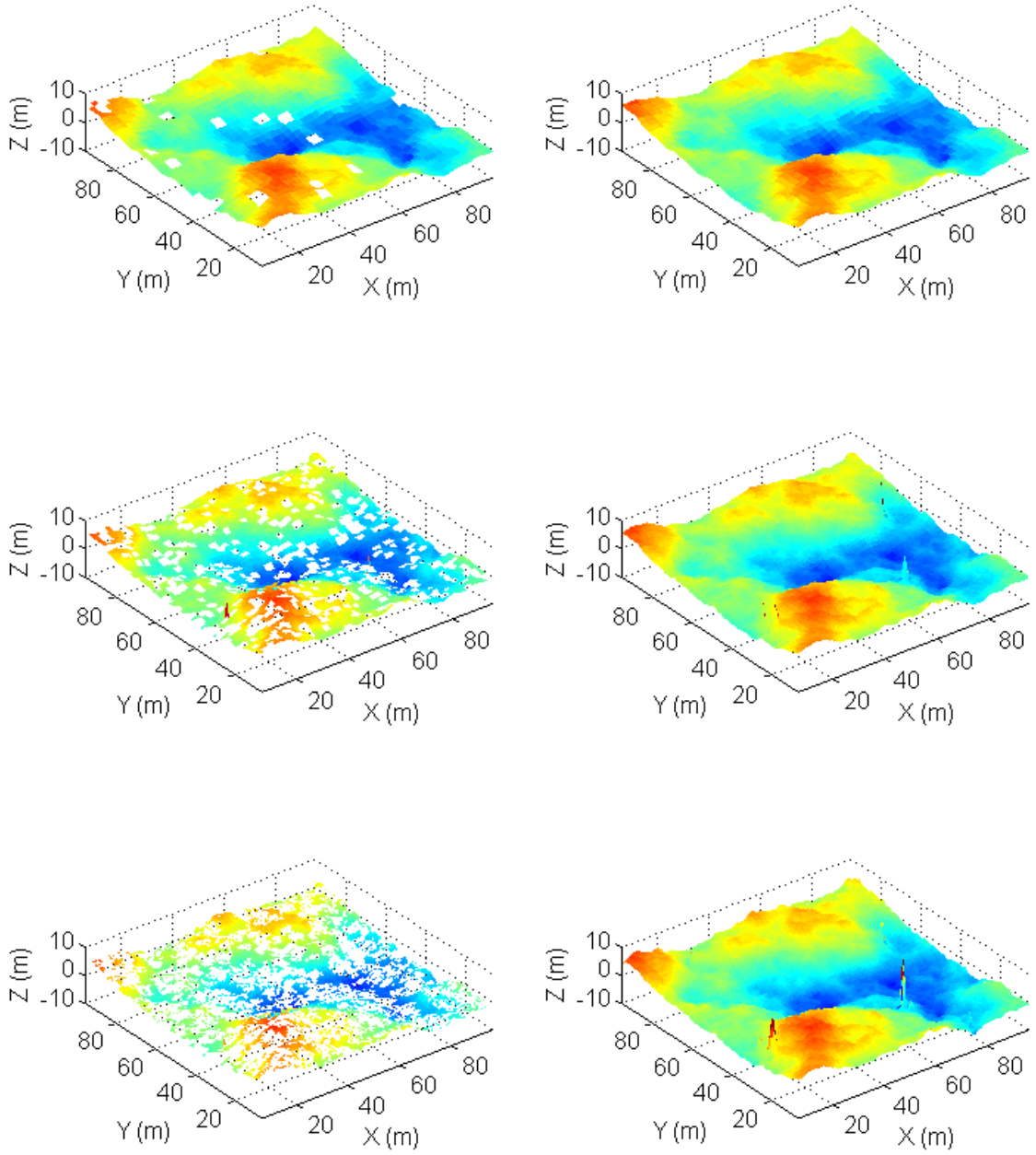


Figure 9.9 – *Reconstructions du MNT pour le jeu de données simulé en incidence normale sur la forêt de Järvselja. De haut en bas, reconstructions avec une grille de résolution* 2m, 1m *et* 0.5m. *A gauche, reconstruction avant interpolation, à droite après interpolation.*

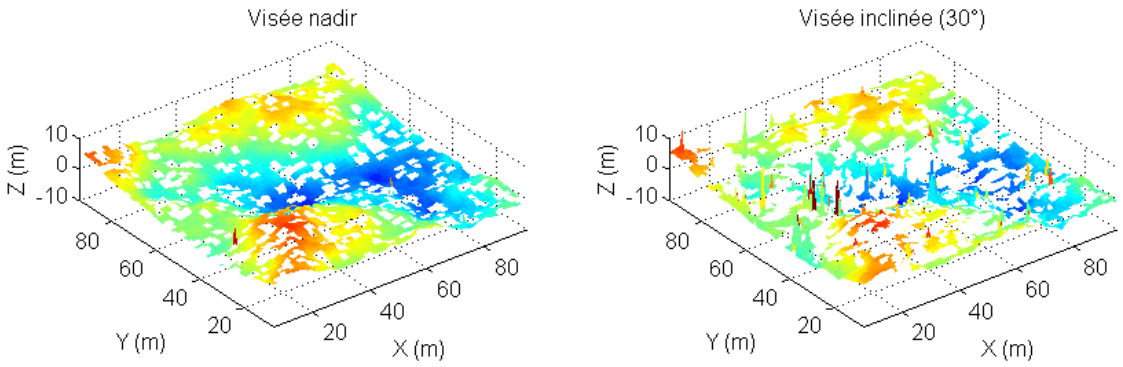


Figure 9.10 – *Reconstructions du MNT pour le jeu de données simulé en incidence normale (à gauche) et en visée inclinée à* 30° *(à droite) sur la forêt de Järvselja avec une grille de résolution de* 1m.

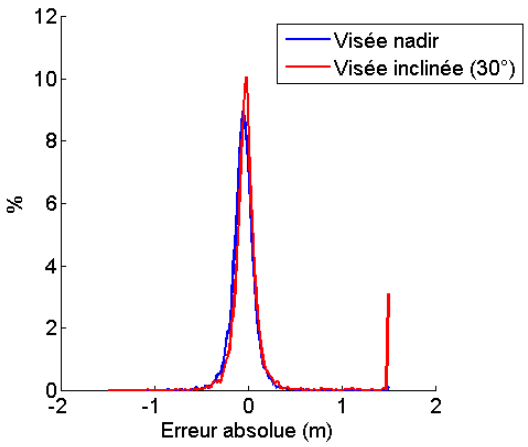


Figure 9.11 – *Distributions des erreurs réalisées lors des reconstructions du MNT pour les jeu de données simulé en incidence normale et en visée inclinée à* 30° *sur la forêt de Järvselja avec une grille de résolution de* 1m. *Les distributions ont été réalisées sur l'intervalle* $[-1.5\text{m}; 1.5\text{m}]$, *par conséquent, toutes les erreurs supérieures à* 1.5m *forment un pic à cette abscisse.*

9.3.4 Synthèse

La table 9.2 reprend toutes les valeurs obtenues pour l'erreur quadratique moyenne, ainsi que pour la couverture de la zone. On y retrouve les conclusions déjà évoquées précédemment :

- Pour les pas de grille les plus importants, l'estimation de la hauteur du sol par la méthode de la médiane est la méthode la plus performante. A mesure que la dimension des cases diminue, et que l'inclinaison des lignes de visées apporte des erreurs de classification, le 10ème centile et le minimum s'avèrent plus robustes, quoique biaisés.
- Pour la visée inclinée, les points aberrants sont à l'origine d'une erreur importante, cette erreur augmente encore après interpolation des valeurs manquantes.
- Pour la visée nadir, la diminution du pas de grille n'induit pas une augmentation importante de l'erreur avant interpolation. Par contre, la couverture de la zone et le nombre de points par case diminue fortement, ce qui provoque une plus importante erreur après interpolation.

D'une manière générale, les erreurs quadratiques moyennes élevées obtenues pour les reconstructions issues du jeu de données avec visée inclinée ne représentent pas vraiment la qualité de la reconstruction obtenue. Il s'agit plutôt ici d'un petit nombre de points provoquant des erreurs très importantes et dégradant fortement l'erreur moyenne. Dans la section qui va suivre, nous nous penchons sur quelques idées permettant de limiter l'impact de ces quelques points.

9.4 Amélioration des performances

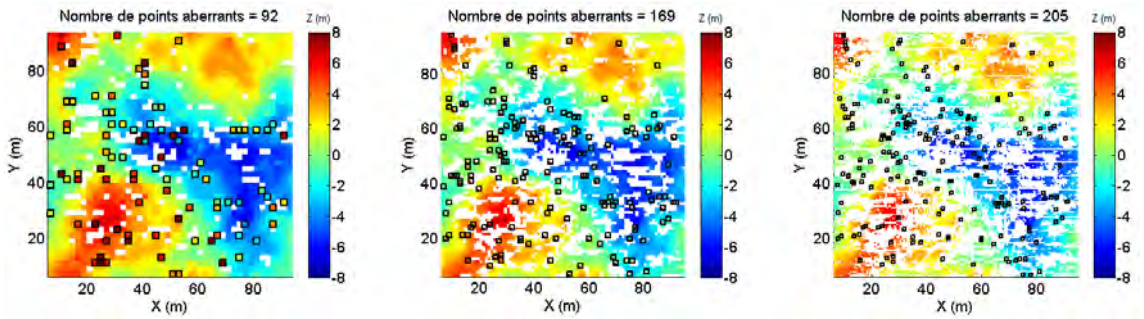


Figure 9.12 – *Reconstructions à trois résolutions (de gauche à droite :* 2m*,* 1m *et* 0.5m*) à partir du jeu de données avec visées inclinées à* 30° *et mise en évidence des cases pour lesquelles l'erreur commise est supérieure à* 1.5m*.*

La source principale d'erreur de la méthode présentée plus haut réside donc dans les erreurs de classification, particulièrement importantes en visée inclinée. Un écho issu de la végétation et identifié à tort comme venant du sol est à l'origine d'une erreur considérable sur l'altitude réelle du sol. L'estimation de l'altitude du sol grâce à une valeur médiane, ou à un centile, permet de s'affranchir dans une certaine mesure de ces points aberrants. Pourtant, lorsque peu d'échos de sols sont présents dans une case, un seul écho mal classifié introduit une erreur considérable. La figure 9.12 montre les reconstructions à trois résolutions à partir du jeu de données avec visée inclinée à 30°. Sur cette figure, nous avons mis en évidence les cases pour lesquelles l'erreur absolue commise est supérieure à 1.5m en valeur absolue (elle est en fait quasiment toujours positive, les points aberrants étant exclusivement situés au dessus du sol).

Table 9.2 – *Récapitulatif des erreurs quadratiques moyennes (exprimées en mètres) obtenues pour différentes résolutions, différentes méthodes d'estimation de l'altitude du sol, pour les deux conditions de visées, avant et après interpolation des valeurs manquantes. Couverture de la zone reconstruite pour chaque jeu de données et chaque résolution. On donne la proportion de case possédant au moins une mesure pour la hauteur du sol, et la fraction de ces cases possédant plus d'une mesure. Jeux de données simulés sur la forêt de Järvselja*

		Résolution = 2 m			
		visée nadir		visée 30°	
		avant interp.	après interp.	avant interp.	après interp.
Méthode d'estimation de Z	Moyenne	0,21	0,22	1,26	1,6
	Médiane	0,18	0,18	1,19	1,54
	Minimum	0,48	0,48	1,04	1,35
	10ème centile	0,38	0,38	1,04	1,36

Couverture	99%	90%
Proportion des cases couvertes avec plus de 1 point	99%	93%

		Résolution = 1 m			
		visée nadir		visée 30°	
		avant interp.	après interp.	avant interp.	après interp.
Méthode d'estimation de Z	Moyenne	0,26	0,3	1,18	1,81
	Médiane	0,26	0,29	1,13	1,76
	Minimum	0,3	0,31	0,99	1,56
	10ème centile	0,28	0,3	1	1,57

Couverture	89%	67%
Proportion des cases couvertes avec plus de 1 point	92%	78%

		Résolution = 0.5 m			
		visée nadir		visée 30°	
		avant interp.	après interp.	avant interp.	après interp.
Méthode d'estimation de Z	Moyenne	0,2	0,35	1,06	3,03
	Médiane	0,2	0,35	1,07	3,05
	Minimum	0,19	0,33	0,95	2,84
	10ème centile	0,19	0,33	0,96	2,87

Couverture	69%	42%
Proportion des cases couvertes avec plus de 1 point	4%	9%

Afin de remédier à ces problèmes, il est possible de formuler quelques corrections simples :

- Comme nous l'avons vu précédemment, il est tout d'abord possible d'estimer la hauteur du sol dans les cases par des méthodes plus robustes aux points extrêmes, en utilisant par exemple l'altitude minimale, ou le dixième centile des altitudes des points. Cependant, les points aberrants situés dans des cases comprenant peu de points restent gênant. En particulier, pour la résolution la plus fine, très peu de cases comportent plus d'un point 3D et les points aberrants ne peuvent pas être traités de cette manière.
- A l'intérieur d'une case, on peut extraire la hauteur du haut et du bas de la couche de végétation, en procédant de façon similaire à ce qui a été fait pour l'altitude du sol. Une fois estimées ces deux hauteurs, il est possible de corriger la classification d'un point étiqueté « sol » et situé à l'intérieur de la couche de végétation.
- Dans les cas où un point aberrant subsiste malgré la correction précédente, il est toujours possible de corriger la surface reconstruite en considérant que la courbure locale ne peut pas dépasser une certaine valeur seuil. Une mesure d'altitude peut donc être considérée comme fausse si elle est trop différente des mesures voisines. Cette opération permet de corriger une erreur, mais en supprimant une mesure, elle diminue la couverture de la zone. Il est cependant raisonnable de supposer que l'interpolation a posteriori de l'altitude à l'endroit incriminé produira un meilleur résultat. Cette opération peut être réalisée avant l'étape d'interpolation, au risque qu'une mesure entourée de cases ne disposant pas de mesures ne soit pas écartée. Elle pourra également être appliquée après l'étape d'interpolation. Une telle méthode possède par contre un inconvénient majeur : elle pourrait retirer des points corrects de la reconstruction si le relief varie brusquement (faille, falaise, ...) ou en présence d'objets à la surface du sol (rochers, troncs, ...).

9.4.1 Correction de la classification

La figure 9.13 montre quatre exemples de cases pour lesquelles un ou plusieurs échos de sol mal classifiés sont à l'origine d'une erreur importante sur l'estimation de l'altitude du sol. Les quatre visualisations incluent une estimation de la hauteur et de l'épaisseur de la couche de végétation grâce au dixième et au quatre-vingt-dixième centile des hauteurs des points de végétation. On observe quatre situations différentes :

- En (a), un écho « sol » mal classifié sera corrigé car il est situé à l'intérieur de la couche de végétation. Cette correction provoquera la suppression de l'information « sol » aberrante pour la case concernée puisqu'elle ne contient pas d'autre écho de sol.
- En (b), un écho « sol » mal classifié sera corrigé et la mesure aberrante sera remplacée par une mesure correcte grâce à un écho de sol correct restant.
- En (c), en raison de nombreux échos « sol » classifiés à tort comme végétation, tous les échos classifiés « sol » seront considérés comme faux, alors qu'au moins un d'entre eux était correct. Dans cette situation, il y aura suppression de la mesure aberrante mais les informations correctes seront également écartées.
- Enfin, en (d), l'écho mal classifié « sol » ne pourra pas être corrigé car il ne se trouve pas dans la couche de végétation. Il subsistera donc ici une mesure aberrante.

La figure 9.14 montre le résultat obtenu après suppression des points étiquetés « sol » et situés à l'intérieur de la couche de végétation. On y remarque une nette diminution du nombre de points aberrants dans la reconstruction. Cependant, le nombre de points corrects également supprimés lors de la correction est relativement important, comme le montre la table 9.3 qui montre les données concernant la proportion de cases de la grille contenant des informations. On y constate que la perte globale d'information est bien trop importante par rapport au nombre de points aberrants corrigés.

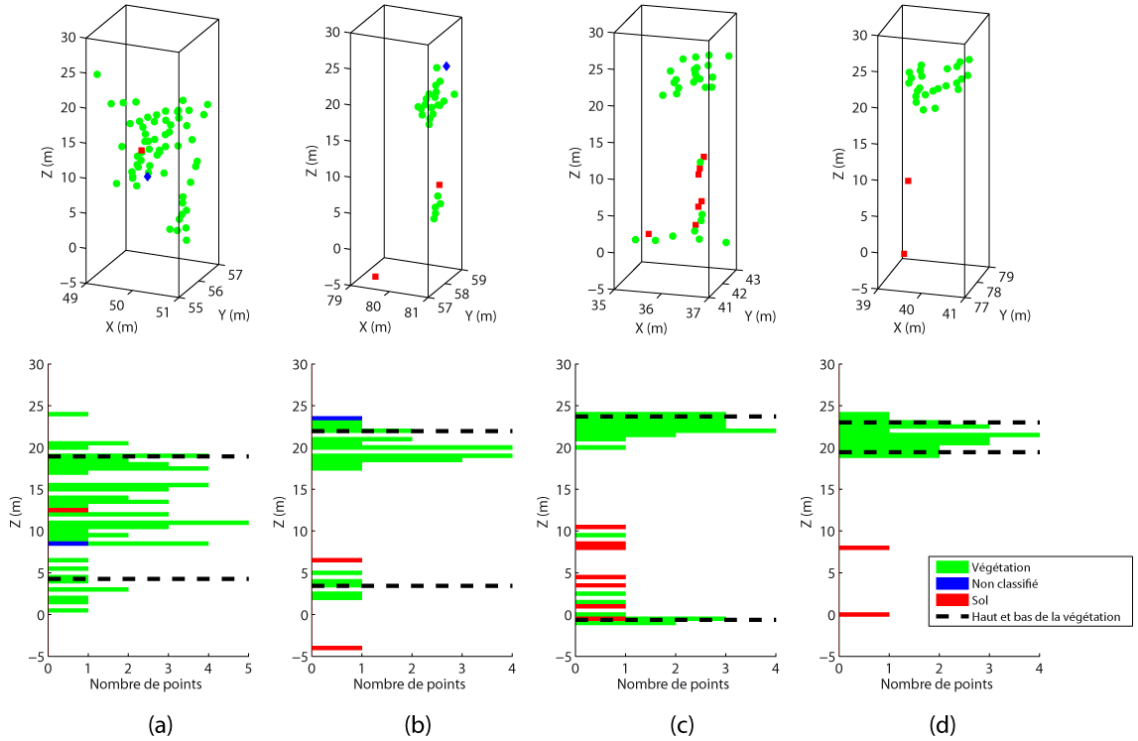


Figure 9.13 – *Exemples de cases obtenues pour la reconstruction à une résolution de* 2m *avec le jeu de données à visée inclinée à* 30° *(forêt de Järvselja) présentant des échos de sol mal classifiés induisant une importante erreur sur l'estimation de l'altitude du sol. En haut, visualisation 3D des points classifiés. En bas, distribution verticale des points, et estimation de la géométrie de la canopée par les dixième et quatre-vingt-dixième centiles des hauteurs des points de végétation.*

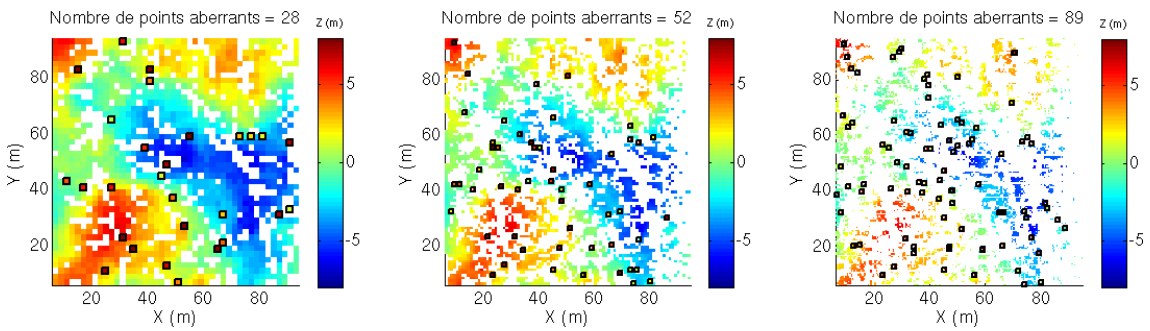


Figure 9.14 – *Reconstructions à trois résolutions (de gauche à droite :* 2m, 1m *et* 0.5m*) à partir du jeu de données avec visées inclinées à* 30° *(forêt de Järvselja) et mise en évidence des cases pour lesquelles l'erreur commise est supérieure à* 1.5m *après correction grâce à la couche de végétation.*

Cette idée de correction de la classification par reconstruction de la géométrie du couvert végétal ne parait donc pas applicable en l'état. Il pourrait être possible de la mettre en œuvre en améliorant la fiabilité de l'estimation de la hauteur du bas de la canopée.

Table 9.3 – *Taux de couverture de la grille de reconstruction des MNT avant et après correction de la classification grâce à la reconstruction de la couche de végétation pour le jeu de données de Järvselja en visée inclinée. Le taux de couverture est exprimé comme la fraction des cases de la grille comportant au moins un point étiqueté « sol ».*

	résolution = 2m	résolution = 1m	résolution = 0.5m
Avant correction	90%	67%	42%
Après correction	73%	40%	17%

9.4.2 Correction des reconstructions

La seconde option de correction des points aberrants rencontrés sur les surfaces reconstruites est en fait un simple lissage des MNT obtenus. En pratique, on procède de la manière suivante :

- La mesure de l'altitude du sol de chaque case est comparée à la moyenne des altitudes de ses voisins, au nombre de 8 si toutes les mesures existent, moins nombreux si des mesures sont manquantes ou si l'on se trouve en bord de grille.
- On compare ensuite la pente maximum existant entre le point considéré et ses voisins à un seuil prédéfini par l'utilisateur. Si la pente dépasse le seuil autorisé, la mesure de l'altitude est jugée aberrante et est retirée.

Cet algorithme de correction des reconstructions a été appliqué au jeu de données simulé avec une visée inclinée sur la forêt estonienne de Järvselja (celui présentant le plus grand nombre de points aberrants). La table 9.4 montre les résultats obtenus pour différentes valeurs du seuil, exprimé en terme de réduction du nombre de points aberrants dans la reconstruction finale, et en donnant pour chaque correction la couverture finale de la zone. En effet, si le seuil est trop faible, il est possible que la correction soit à l'origine de la perte d'information dans les zones où le terrain présente naturellement une pente importante.

Table 9.4 – *Résultats obtenus pour la correction de la reconstruction issue du jeu de données simulé de Järvselja en visée inclinée pour différentes valeurs du seuil. La performance de la correction est exprimée en terme de réduction du nombre de points aberrants dans la reconstruction finale, et en donnant pour chaque correction la couverture finale de la zone (à comparer à la couverture initiale avant correction).*

	Résolution = 2 m		Résolution = 1 m		Résolution = 0.5 m	
	Nombre de points aberrants	Couverture de la zone	Nombre de points aberrants	Couverture de la zone	Nombre de points aberrants	Couverture de la zone
Sans correction	**37**	**90%**	**96**	**67%**	**200**	**42%**
Seuil = 0.5 m	0	9%	5	30%	31	35%
Seuil = 1 m	0	43%	5	57%	31	40%
Seuil = 2 m	0	75%	5	60%	35	40%
Seuil = 3 m	2	79%	10	62%	44	40%
Seuil = 4 m	3	80%	18	63%	61	40%
Seuil = 5 m	4	82%	28	63%	75	40%

On constate que pour les valeurs du seuil trop faibles, de nombreux points sont éliminés à tort. Ceci est particulièrement vrai pour la reconstruction à 2m de résolution. En effet, plus la case de grille est grande, plus l'écart d'altitude entre deux centres de cases voisines est susceptible d'être naturellement important. Pour cette raison, il apparait plus logique de limiter la pente formée par deux voisins plutôt que l'écart d'altitude. C'est d'ailleurs ce qui apparait sur la table 9.4 lorsque l'on constate que, dans cet exemple, en bon compromis entre le nombre de points aberrants corrigés et la quantité de mesures perdues est obtenu pour un seuil égal au double de la résolution de la reconstruction. Cela revient à limiter la tangente de la pente à 2, soit la pente locale entre deux voisins à un peu plus de 63°.

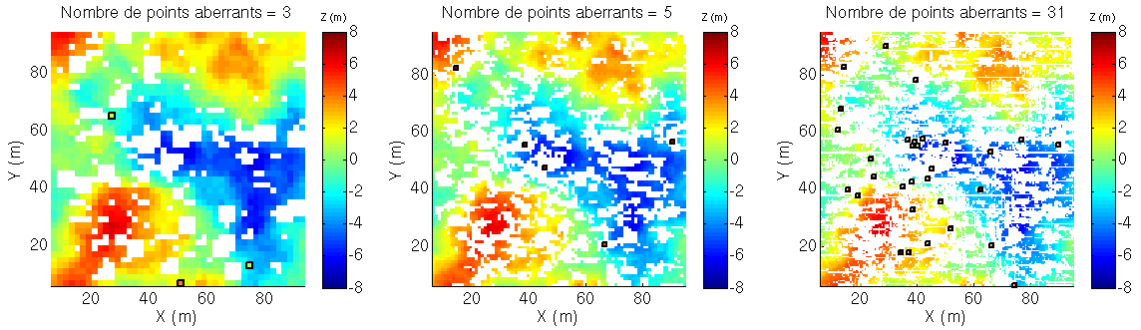


Figure 9.15 – *Reconstructions à trois résolutions (de gauche à droite :* 2m*,* 1m *et* 0.5m*) à partir du jeu de données avec visées inclinées à* 30° *et mise en évidence des cases pour lesquelles l'erreur commise est supérieure à* 1.5m *après correction par limitation de la pente locale.*

La figure 9.15 montre les surfaces reconstruites après correction grâce à ce critère. Comme on peut le constater, de nombreux points aberrants présents initialement (voir figure 9.12) ont été retirés, et la quantité totale d'information perdue est largement inférieure à ce que l'on a pu observer avec la méthode de correction de la classification par reconstruction de la couche de végétation (figure 9.14).

9.5 Synthèse

Dans cette section, nous avons mis en place une méthode de reconstruction du MNT sous couvert végétal à partir des données lidar onde complète traitées et classifiées précédemment. Nous utilisons une approche dite « raster » consistant à projeter le nuage de points classifié « sol » sur une grille régulière de résolution fixée. L'altitude du sol est alors approchée par la valeur médiane des altitudes des points de chaque case de la grille.

On procède alors à une correction de la reconstruction visant à supprimer les points aberrants issus d'erreurs de classifications. Ces points se caractérisent par une altitude très supérieure à celle de leur voisins. Nous les supprimons donc en procédant au filtrage de la reconstruction par une limitation de la pente locale.

Une fois cette étape de correction effectuée, il est possible, si besoin, de compléter la reconstruction obtenue par une interpolation des valeurs manquantes.

C'est cette procédure de reconstruction qui servira par la suite de base à la combinaison de jeux de données acquis sous différentes visées.

Les figures 9.16 et 9.17 dressent le bilan des reconstructions effectuées sur les jeux de données simulé avec DELiS sur la forêt de Järvselja. On y trouve les reconstructions avant et après la phase d'interpolation des données manquantes ainsi que les distributions des erreurs d'estimation de la hauteur du sol.

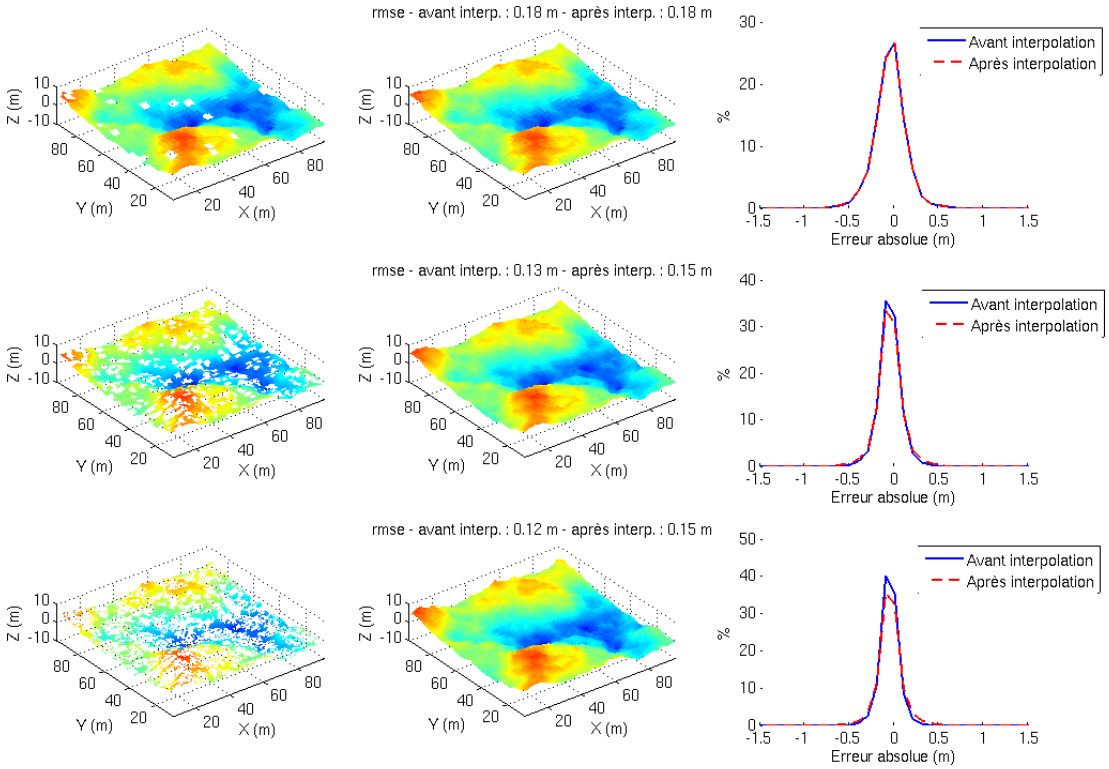


Figure 9.16 – *Reconstructions des MNT sous couvert végétal pour le jeu de données de Järvselja simulé en visée nadir. De haut en bas, résolutions de* 2m, 1m *et* 0.5m. *De gauche à droite, reconstruction avant interpolation, après interpolation, distribution des erreurs absolues d'estimation de la hauteur du sol.*

Tout d'abord, on constate que la reconstruction issue du jeu de données simulé en visée nadir est de bonne qualité, au sens où tous les points aberrants ont été supprimés lors de la phase de correction. Lorsque le pas de grille diminue, il est naturel de constater que le nombre de mesures manquantes est plus important, et donc que l'interpolation des données manquantes induit une erreur plus importante. Les erreurs quadratiques moyennes (RMSE) obtenues sont très intéressantes. Elles sont à mettre en relation avec les performances rapportées par *Hyyppä* et al. *(2004)* et résumées dans la table 9.5.

Table 9.5 – *Performances obtenues pour la reconstruction de modèles numériques de terrain en zone forestière.*

Source	Résolution	Densité de mesures	RMSE
Kraus et Pfeifer (1998)	3.125 m	0.1 pts/m^2	57 cm
Hyyppä et al. *(2000)*	1 m	10 pts/m^2	22 cm
Hyyppä et al. *(2001)*	1 m	4 à 10 pts/m^2	22 à 40 cm
Ahokas et al. *(2002)*	0.3 m	4 à 10 pts/m^2	13 à 41 cm
Reutebuch et al. *(2003)*	?	4 pts/m^2	14 à 29 cm

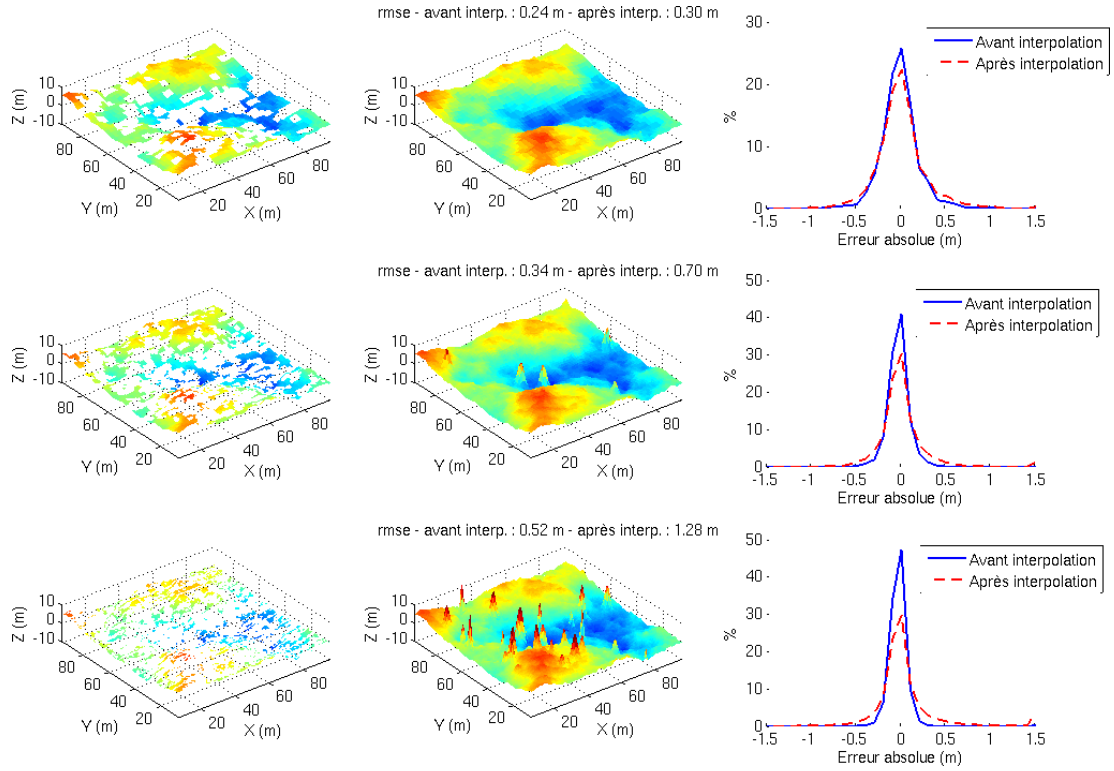


Figure 9.17 – *Reconstructions des MNT sous couvert végétal pour le jeu de données de Järvselja simulé en visée inclinée à* 30°. *De haut en bas, résolutions de* 2m, 1m *et* 0.5m. *De gauche à droite, reconstruction avant interpolation, après interpolation, distribution des erreurs absolues d'estimation de la hauteur du sol.*

Mis à part la toute première reconstruction, dont la résolution (3.125m) est conditionnée par les moyens alors disponibles (un point tous les 3.1m au sol environ), les autres expériences plus récentes permettent d'apprécier la représentativité des simulations réalisées avec DELiS ainsi que des méthodes de reconstruction mises en place. Dans notre cas, avec des résolutions de 2m, 1m et 0.5m, et avec un scanner laser aéroporté fournissant une densité de points au sol d'environ 4 pts/m^2, l'erreur quadratique moyenne obtenue (entre 12 et 18 cm) est légèrement plus faible que dans les cas réels répertoriés. Cet écart est probablement lié à la nature simplifiée de la scène modélisée, et en particulier au sol nu utilisé. Dans une scène réelle, la présence de végétation basse, de branchages ou d'autres éléments disposés sur le sol induira une erreur supplémentaire.

La seconde conclusion concerne le jeu de données acquis en visée inclinée à 30°. On constate sur la figure 9.17 que, si la reconstruction à 2m de résolution donne un résultat de qualité similaire à celui obtenu avec le jeu de données en visée nadir, ce n'est pas du tout le cas pour les résolutions plus faibles. En effet, la persistance de points aberrants ainsi qu'une moins bonne couverture de la zone à reconstruire sont à l'origine d'une erreur quadratique moyenne bien plus importante (jusqu'à 1.28m dans le pire des cas).

Il est possible d'améliorer ces reconstructions en poussant plus en avant les techniques de correction des points aberrants, ou même simplement en réitérant la méthode déjà proposée. Le résultat exposé ici permet cependant de formuler une recommandation quant à l'utilisation d'une visée nadir (ou la plus proche possible de la visée nadir) pour la réalisation de MNT sous couvert végétal utilisant une seule acquisition.

Enfin, grâce aux possibilités du modèle DELiS en termes de modélisation de la végétation, nous avons été en mesure de simuler l'observation d'une forêt similaire en tous points à celle de Järvselja, mais avec un LAI double (6.8 au lieu de 3.4). Pour ce faire, nous utilisons le même modèle de forêt dans lequel les feuilles des arbres ont été remplacées par des feuilles triangulaires semblables mais de surface double. Le résultat de la reconstruction à partir d'une simulation en visée nadir est exposé sur la figure 9.18. On y constate que la différence principale avec les reconstructions de la figure 9.16 concerne la couverture de la zone. En raison du LAI plus élevé, beaucoup moins de points sont disponibles au sol, ce qui entraine une plus grande erreur après interpolation des zones manquantes.

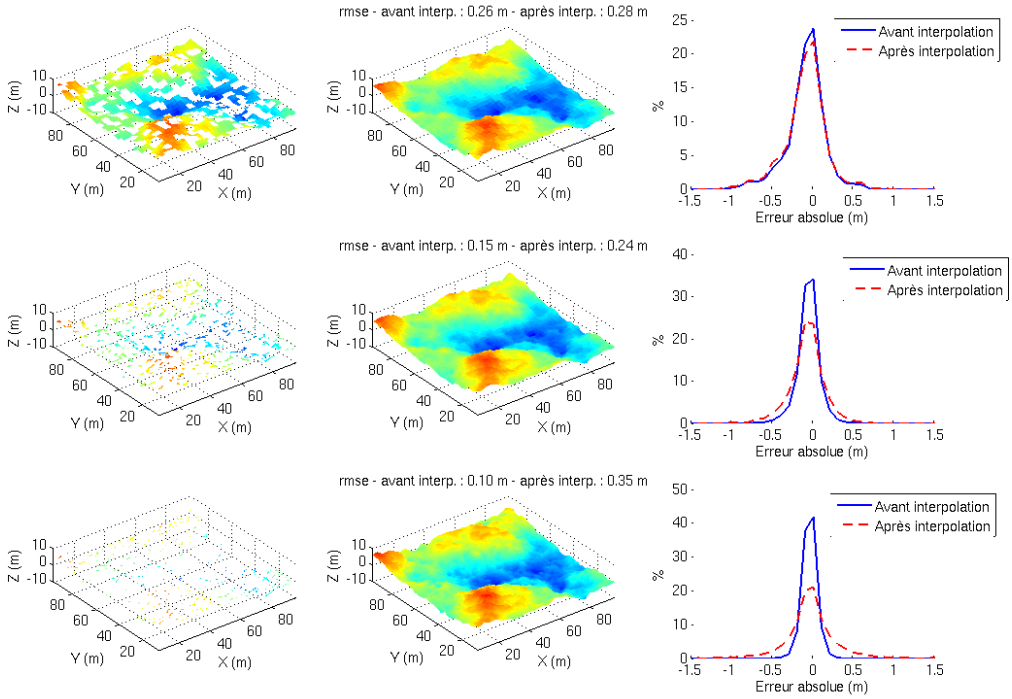


Figure 9.18 – *Reconstructions des MNT sous couvert végétal pour le jeu de données de Järvselja dont le LAI a été doublé, simulé en visée nadir. De haut en bas, résolutions de* 2m, 1m *et* 0.5m. *De gauche à droite, reconstruction avant interpolation, après interpolation, distribution des erreurs absolues d'estimation de la hauteur du sol.*

Au regard de ces résultats, et dans les cas de figures abordés ici, il semble donc que le principal facteur déterminant la qualité de la reconstruction d'un modèle numérique de terrain sous couvert végétal soit la quantité d'information disponible sur la surface du sol. Les visées inclinées quant à elles pourront s'avérer utile pour compléter et améliorer les reconstructions dans des zones où la densité du couvert végétal pourrait rendre les reconstructions plus difficiles. C'est l'objet de la section suivante.

9.6 Combinaison de visées multi-angulaires

9.6.1 Introduction

L'idée de la combinaison des points de vue pour la reconstruction de la géométrie d'un terrain situé sous le couvert végétal peut être mise en œuvre dans plusieurs contextes.

Tout d'abord, les relevés topographiques sont généralement réalisés avec un recouvrement, de sorte que les zones observées en bord de fauchée le sont naturellement sous des points de vue différents. Cependant, les scanners aéroportés utilisés pour la topographie observent le sol avec des incidences de $+15^o$ à -15° autour de la visée nadir, des angles d'incidence plus forts pouvant poser problème pour la détection du signal retour, forcément plus faible.

La combinaison de visées multi-angulaires sera donc plutôt envisagée dans des contextes dédiés, lorsque la reconstruction précise d'une zone géographique limitée sera nécessaire. Dans ce cas, il est possible d'imaginer plusieurs configurations des systèmes, par exemple :

- Un scanner aéroporté unique observant une zone d'abord vers l'avant, puis en visée nadir, puis vers l'arrière, permettrait la combinaison de trois directions de visée situées dans le plan défini par la direction verticale et par la direction de déplacement de l'aéronef.
- Un aéronef se déplaçant circulairement autour de la zone à étudier permettrait de fournir plusieurs directions de visée avec le même angle zénithal mais des azimuts différents.
- Enfin, il est possible d'envisager un scénario de coopération entre différents aéronefs. Un tel type de mise en œuvre permettrait de disposer de visées très variées, mais également d'altitudes différentes, voire de types de capteurs différents.

Quelle que soit la configuration choisie, et bien que le problème diffère selon ce choix, la difficulté majeure de la combinaison des visées multi-angulaires est probablement le positionnement relatif des différentes acquisitions. Néanmoins, afin de nous concentrer sur le problème de la reconstruction, nous considérerons ici que les différents jeux de données sont parfaitement localisés les uns par rapport aux autres, et nous nous concentrerons sur la quantification de l'apport des visées multi-angulaires, et sur la recherche des directions optimales d'observation.

9.6.2 Simulations

Afin de tester la combinaison des visées multi-angulaires pour la reconstruction d'un MNT situé sous le couvert végétal de la forêt de Järvselja, nous avons simulé l'observation de celle-ci par un scanner aéroporté observant la scène tout d'abord avec un angle d'incidence de 30° vers l'avant, puis en visée nadir, et enfin avec un angle de 30° vers l'arrière. Afin d'étudier l'apport de la combinaison de visées mutli-angulaires dans des conditions plus contraignantes, nous utiliserons dans cette section la forêt de Järvselja dont le LAI a été artificiellement doublé ($LAI = 6.8$).

La configuration d'observation produit trois jeux de données qui ont été traités selon les méthodes décrites dans les chapitres précédents, jusqu'à la reconstruction de trois surfaces représentant le même MNT (figure 9.19).

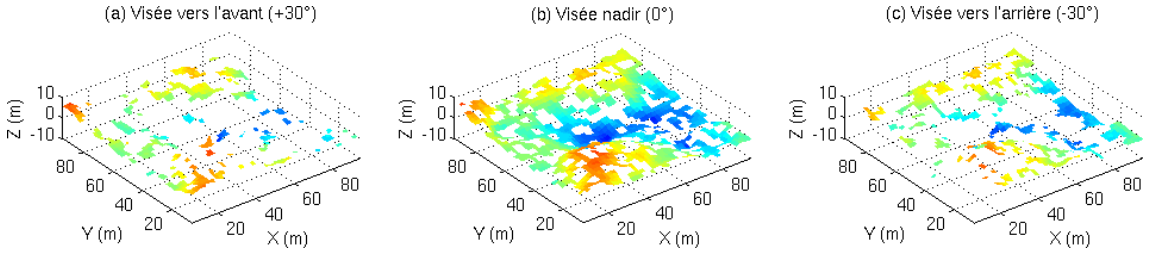


Figure 9.19 – *Reconstructions à une résolution de* 2m *(avant interpolation) issues des trois acquisitions simulées grâce à DELiS sur la forêt de Järvselja dont le LAI a été doublé.*

9.6.3 Combinaison des visées

Ayant supposé que les jeux de données sont parfaitement co-localisés, nous adoptons ici la stratégie de combinaison suivante :

- Les jeux de données sont traités indépendamment jusqu'à leur classification.
- Ils sont fusionnés en un nuage de points classifiés unique.
- On procède alors à la reconstruction du MNT de la même manière qu'expliqué précédemment, mais en utilisant les échos provenant des trois jeux de données.

De cette façon, le nuage d'échos lidar brut utilisé pour la reconstruction du MNT comporte approximativement trois fois plus de points (car nous utilisons trois jeux de données pour trois angles de visée différents) et devrait donc fournir un résultat plus précis.

Dans cette section, nous étudions tout d'abord comment les trois acquisitions successives permettent d'améliorer la couverture de la zone observée, puis comment la combinaison des données influe sur le résultats des reconstructions.

Couverture de la zone

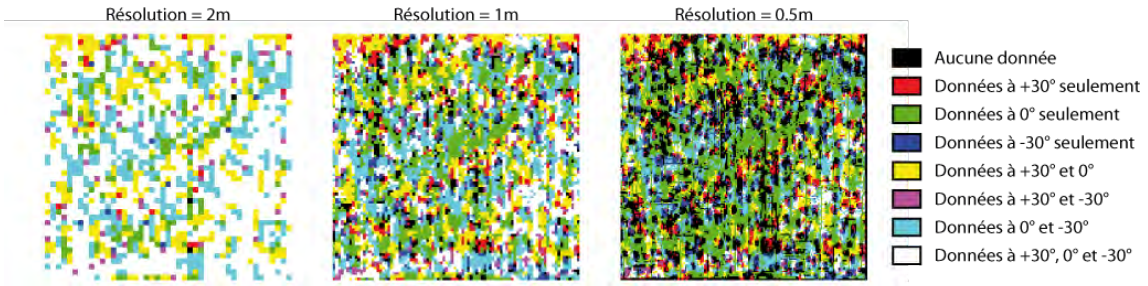


Figure 9.20 – *Composition colorée traduisant la couverture de la zone observée par les trois visées utilisées. La composante RVB de chaque pixel vaut 1 si des points du type sol sont disponibles dans la case correspondante et 0 sinon. Le rouge est utilisé pour le jeu de données acquis en visée vers l'avant (+30°), le vert pour le jeu de données acquis en visée nadir et le bleu pour le jeu de données acquis en visée vers l'arrière (−30°).*

La figure 9.20 montre la couverture de la zone observée par les trois jeux de données. On constate que pour toutes les résolutions, c'est l'acquisition en visée nadir qui apporte la meilleure couverture. Cette impression est confirmée par les données de couvertures réper-

toriées dans la table 9.6. On y constate que c'est en effet toujours la visée nadir qui apporte le plus d'informations sur le sol, mais également que même la combinaison des deux visées inclinées ne parvient pas à apporter autant d'informations. Par contre, la combinaison des trois visées permet toujours d'améliorer la couverture globale de la zone.

Table 9.6 – *Couverture de la zone forestière de Järvselja par les acquisitions aux trois angles de visées : +30° vers l'avant (1), 0° visée nadir (2) et −30° vers l'arrière (3).*

Jeu(x) de données	(1)	(2)	(3)	(1) et (3)	(1) et (2) et (3)
Résolution = 2 m	72%	96%	75%	92%	100%
Résolution = 1 m	48%	78%	50%	73%	94%
Résolution = 0.5 m	28%	60%	29%	47%	78%

Reconstruction du MNT

Nous procédons alors à la reconstruction du MNT pour les trois résolutions, à partir du jeu de données fusionné, et en suivant la méthode exposée plus haut. Les résultats de cette reconstruction sont exposés sur la figure 9.21.

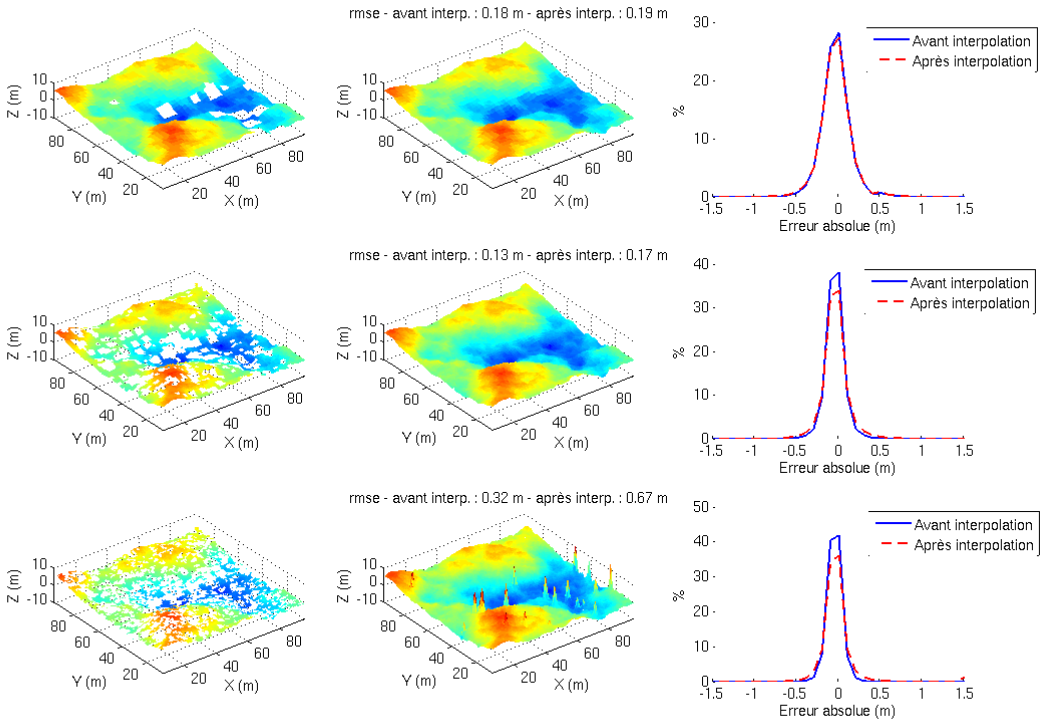


Figure 9.21 – *Reconstructions des MNT sous couvert végétal pour le jeu de données de Järvselja dont le LAI a été doublé grâce à la combinaison des jeux de données acquis sous trois visées différentes (−30°, 0° et +30°). De haut en bas, résolutions de* 2m, 1m *et* 0.5m. *De gauche à droite, reconstruction avant interpolation, après interpolation, distribution des erreurs absolues d'estimation de la hauteur du sol.*

Table 9.7 – *Erreurs quadratiques moyennes obtenues pour la reconstruction du MNT situé sous la forêt de Järvselja (dont le LAI a été doublé). Comparaison des performances obtenues avec la visée nadir uniquement, et en combinant les acquisitions sous trois visées.*

Jeu(x) de données	Nadir uniquement	Combinaison 3 vues
	avant / après interpolation	avant / après interpolation
Résolution = 2 m	26cm / 28cm	18cm / 19cm
Résolution = 1 m	15cm / 24cm	13cm / 17cm
Résolution = 0.5 m	10cm / 35cm	32cm / 67cm

La table 9.7 résume les erreurs quadratiques moyennes obtenues pour les reconstructions en visée nadir seule et en combinaison des trois visées. On y constate que la combinaison des visées multi-angulaires permet d'améliorer la qualité globale de la reconstruction pour les résolutions les plus basses (2m et 1m). A plus haute résolution, la présence de points aberrants dans les jeux de données acquis avec des visées inclinées explique le moins bon résultat global obtenu en combinant les jeux de données.

Conclusion

En conclusion, nous avons vu que la combinaison des visées multi-angulaires, dans le cas étudié ici, peut permettre d'obtenir de meilleures performances lors de la reconstruction d'un modèle numérique de terrain situé sous couvert végétal.

Cependant, les points aberrants issus de mauvaises classifications présents dans les jeux de données acquis en visées inclinées (probablement dus aux troncs des arbres) limitent l'apport de cette technique aux résolutions les plus hautes. En effet, plus la dimensions des cases de la grille est faible, plus il est compliqué de corriger les erreurs de reconstruction liées aux points aberrants.

Par contre, nous avons montré que dans tous les cas, et même particulièrement lorsque la résolution est la plus haute, combiner plusieurs acquisitions obtenues sous plusieurs points de vue permet d'obtenir une meilleure couverture de la zone, donc de reconstruire la géométrie du terrain dans les zones ou c'était impossible avec une seule acquisition.

Dans le cas où notre attention se porte sur une zone restreinte (quelques dizaines de mètres carrés par exemple) dont l'observation est rendue difficile par un couvert végétal très dense, il peut être absolument nécessaire de combiner plusieurs points de vue afin d'obtenir une information suffisante. Dans la section suivante, nous montrons comment, à partir d'une acquisition « de repérage » il est possible de choisir la ou les directions d'observation qui apporteront le plus d'information sur une zone qui nous intéresse.

9.6.4 Recherche de la visée optimale

De cette première mise en œuvre de combinaison de visées multi-angulaires, il ressort globalement que l'apport des visées supplémentaires permet surtout d'augmenter la quantité d'échos de sol disponibles grâce à la possibilité de voir le sol à travers d'autres espaces libres de feuillage.

La notion de distribution spatiale du feuillage parait donc déterminante. Dans ce qui précède, nous avons tenté d'utiliser une première fois les informations données par les échos lidar de végétation afin de corriger la classification de certains points. Nous montrons ici comment il est possible de les utiliser pour optimiser le choix des visées à combiner dans le but d'observer une zone particulière du sol.

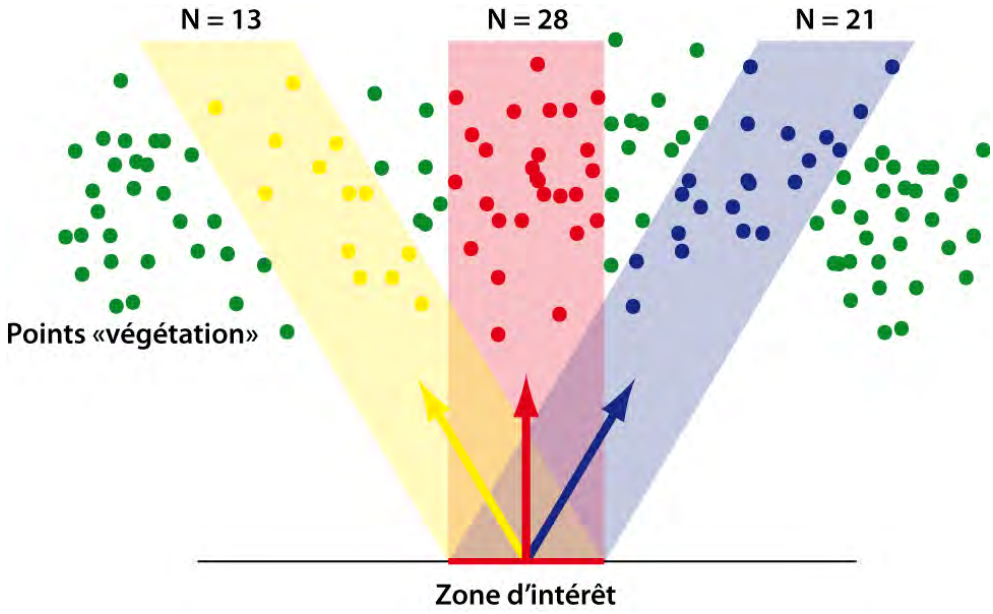


Figure 9.22 – *Schéma de principe de l'évaluation de la densité de végétation dans toutes les directions à partir d'une zone d'intérêt.*

Principe

Concentrons nous sur une zone restreinte du sol, par exemple un carré de 5m de coté, que l'on désire étudier plus particulièrement. A partir de cette zone, nous allons évaluer la densité du couvert végétal dans toutes les directions de l'espace. Pour ce faire, nous supposons que la densité du feuillage est directement liée au nombre d'échos lidar de végétation.

La figure 9.22 illustre le principe d'évaluation du nombre d'échos de végétation dans les différentes directions de l'espace. Cette estimation est réalisée en projetant le nuage de points « végétation » sur le plan horizontal lié à la zone d'intérêt selon la direction évaluée. On obtient alors une cartographie de la densité du couvert végétal vu depuis la zone d'intérêt et dans toutes les directions sondées.

Application

Afin d'illustrer notre méthode, nous avons choisi une zone de 5m de coté pour laquelle nous disposons de peu d'échos de sol dans le jeu de données acquis en visée nadir. Cette zone est localisée sur la figure 9.23. Cette figure montre également la faible couverture par le jeu de données lidar en visée nadir.

Le résultat de l'estimation de la densité du feuillage dans les directions définies en coordonnées sphériques par angle zénithal inférieur à 60° est représenté sur la figure 9.24. Nous avons exclu les visées d'incidence supérieure à 60° car, d'une part une acquisition avec une telle incidence représente une difficulté technique, et d'autre part il devient peu probable que la pénétration sous le feuillage soit améliorée à de telles incidences.

La figure 9.24 met en évidence la présence d'une zone de végétation compacte en $(\theta, \phi) = (24^o, 290^o)$, et de quelques zones moins denses, notamment dans la direction $(\theta, \phi) = (24^o, 100^o)$. La partie peu dense visible entre $\phi = 50^o$ et $\phi = 140^o$ s'explique par la présence de l'orée de la forêt dans cette direction.

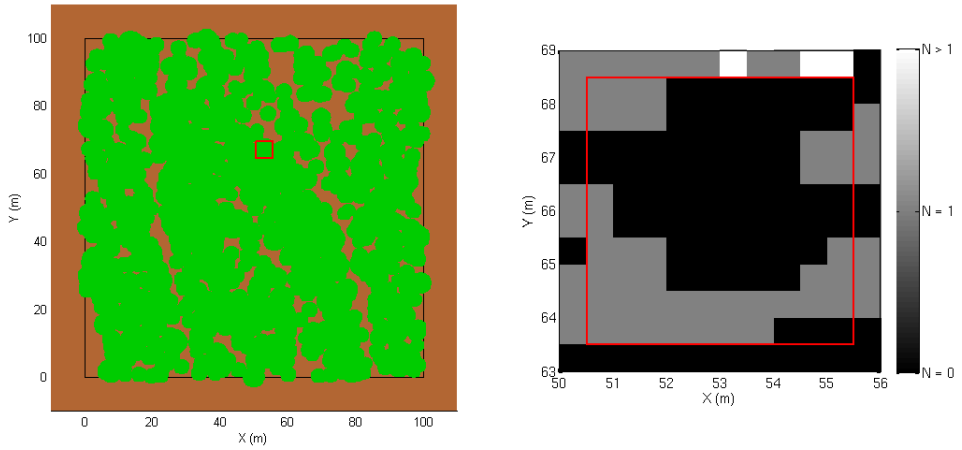


Figure 9.23 – *Localisation de la zone choisie dans la forêt de Järvselja (à gauche) et sa couverture en termes de nombre de points de sol par case en visée nadir (résolution* 0.5m*).*

Nous avons donc simulé ensuite l'observation de la zone choisie selon la direction de visée optimale identifiée ($(\theta, \phi) = (24^o, 100^o)$). Pour cela, nous simulons le survol de la zone suivant l'axe $\phi = 100^o$ par un scanner laser aéroporté observant vers l'avant avec une visée inclinée à 24°. Les données simulées sont ensuites traitées de la même façon que toutes les données utilisées précédemment pour aboutir à une reconstruction du MNT.

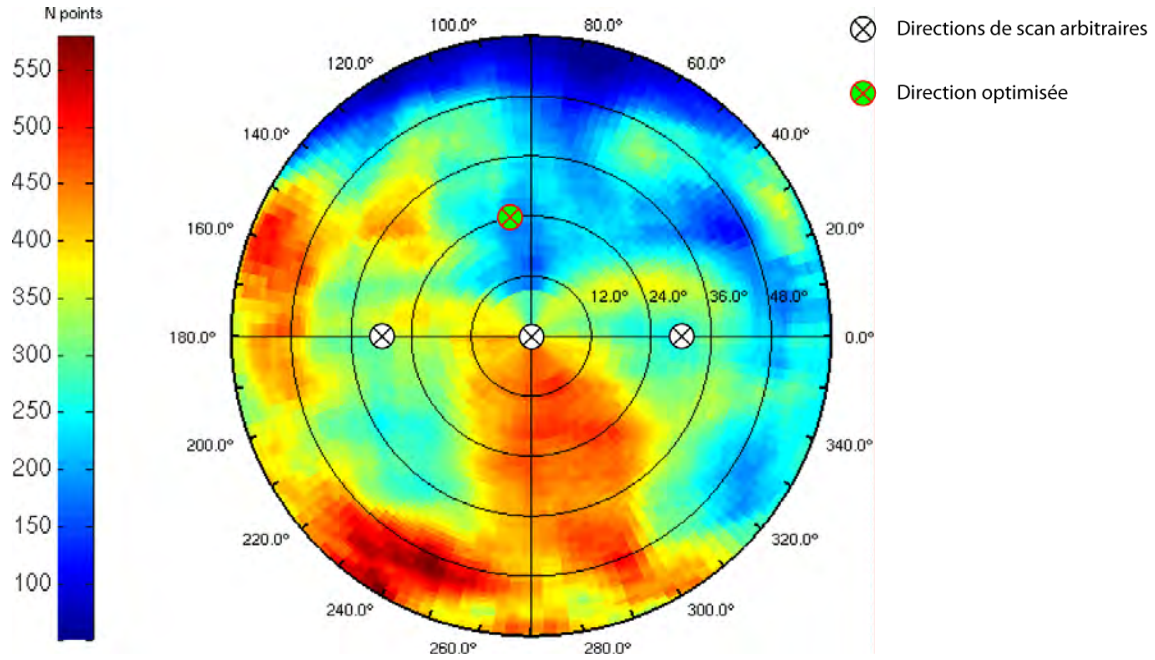


Figure 9.24 – *Evaluation de la densité du feuillage sur la zone de* 5m *de coté centrée en* $(X, Y) = (53, 67)$ *à partir du jeu de données acquis en visée nadir. La densité du feuillage est exprimée en terme de nombre d'échos lidar de végétation présents dans chaque direction. Les directions de scan utilisées précédemment ainsi que la direction optimale choisie sont matérialisées par les cercles barrés.*

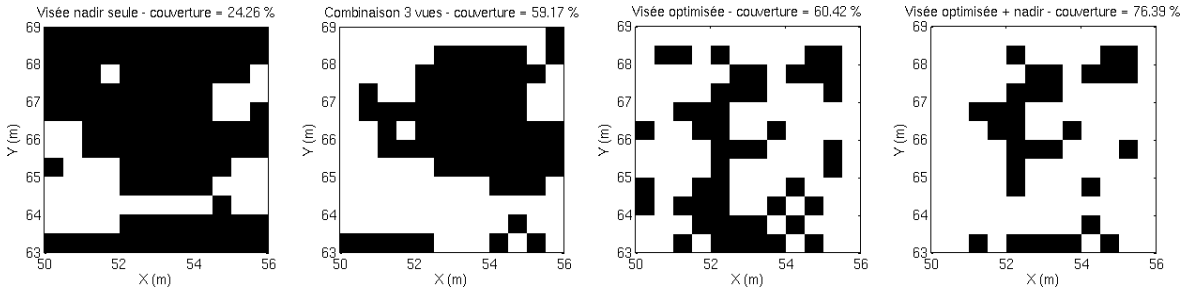


Figure 9.25 – *Couverture de la zone choisie par les différentes acquisitions pour une reconstruction à une résolution de* 0.5m. *Les pixels blancs marquent les cases pour lesquelles on dispose d'une information, les noirs celles pour lesquelles aucune information n'est disponible. De gauche à droite : visée nadir (vol de reconnaissance), combinaison des trois visées multi-angulaires utilisées dans la section précédente, visée optimisée seule, visée optimisée combinée avec la visée nadir du vol de reconnaissance.*

La figure 9.25 montre l'apport de cette visée en terme de couverture de la zone au sol. On constate que le choix de la visée réalisé sur la base de la densité du couvert végétal permet d'apporter une quantité importante d'information. En effet, après traitement (classification, reconstruction, correction des points aberrants), la visée optimale utilisée seule apporte une meilleure couverture de la zone que la combinaison des trois visées multi-angulaires précédemment utilisées, et qui avaient été choisies arbitrairement. La combinaison avec la visée nadir ayant permis de choisir la visée optimisée donne naturellement une couverture encore meilleure.

Enfin, la figure 9.26 montre les trois reconstructions obtenues en suivant les trois stratégies envisagées. L'utilisation d'une seule acquisition en visée nadir se révèle insuffisante pour la reconstruction précise de la zone d'intérêt en raison de la trop faible capacité à traverser la végétation. Par contre, elle permet, grâce à l'exploitation de l'information qu'elle nous donne sur la distribution du couvert végétal, de choisir une visée qui apportera plus d'informations. La combinaison de ces deux visées, la première utilisée comme repérage, et la seconde choisie de manière optimale, permet en effet d'obtenir une meilleure couverture de la zone qu'en utilisant trois visées multi-angulaires choisies arbitrairement. La meilleure performance de la reconstruction avec la visée optimisée s'explique surtout par une meilleure pénétration du couvert végétal, moins dense dans cette direction d'observation. La disponibilité d'un plus grand nombre de points de mesure à la surface du sol permet alors d'interpoler les valeurs manquantes avec une plus grande fiabilité.

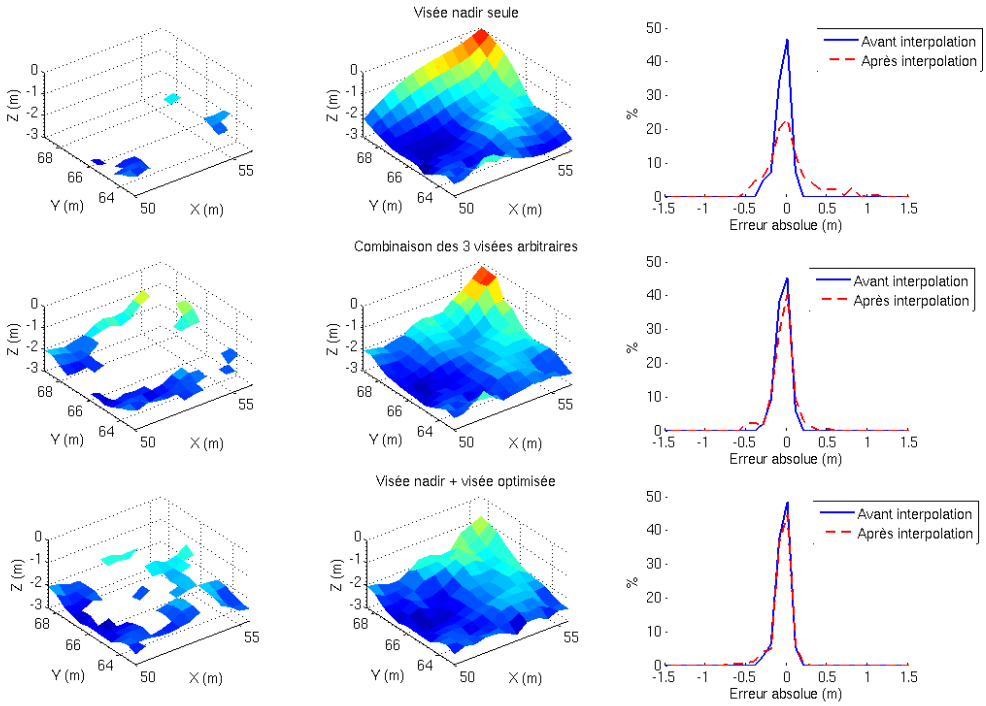


Figure 9.26 – *Reconstructions de la zone choisie à une résolution de* 0.5m *suivant différentes stratégies. De haut en bas : visée nadir seulement, combinaison des 3 visées utilisées précédemment et choisies arbitrairement, combinaison de la visée nadir et de la visée choisie de façon optimale. De gauche à droite : reconstruction avant interpolation des parties manquantes, après interpolation, distributions des erreurs absolues.*

9.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis en place une méthode de reconstruction pour les modèles numériques de terrain (MNT) consistant à projeter le nuage de point sur une grille régulière, et à estimer ensuite l'altitude du sol à l'intérieur de chaque case de la grille. La mise en œuvre de cette méthode avec les jeux de données simulés grâce à DELiS nous a permis d'en tester les performances, l'utilisation d'un simulateur nous permettant de disposer d'une référence parfaite pour le MNT. Nous avons alors pu constater que les performances atteintes étaient similaires à celles obtenues dans des situations opérationnelles (table 9.5). L'objectif initial n'était pourtant pas la mise au point d'une méthode de reconstruction performante, mais plutôt le développement d'une chaîne de traitement simple qui nous permettrait d'évaluer ensuite l'impact de différents facteurs sur la qualité des reconstructions. Cette chaîne de traitement est schématisée dans son ensemble sur la figure 9.27.

Nous avons alors évalué la sensibilité du processus de reconstruction à quelques uns de ses paramètres. Suivant la résolution souhaitée pour la reconstruction du MNT, les problèmes rencontrés diffèrent. Lorsque le pas de grille est relativement important (comparativement à la densité de points du scan lidar, dans notre cas 2m de résolution alors que le scan lidar donne environ 4 points par mètre carré), chaque case de grille contient de nombreux points 3D. Le problème principal consiste alors à estimer correctement l'altitude du sol à

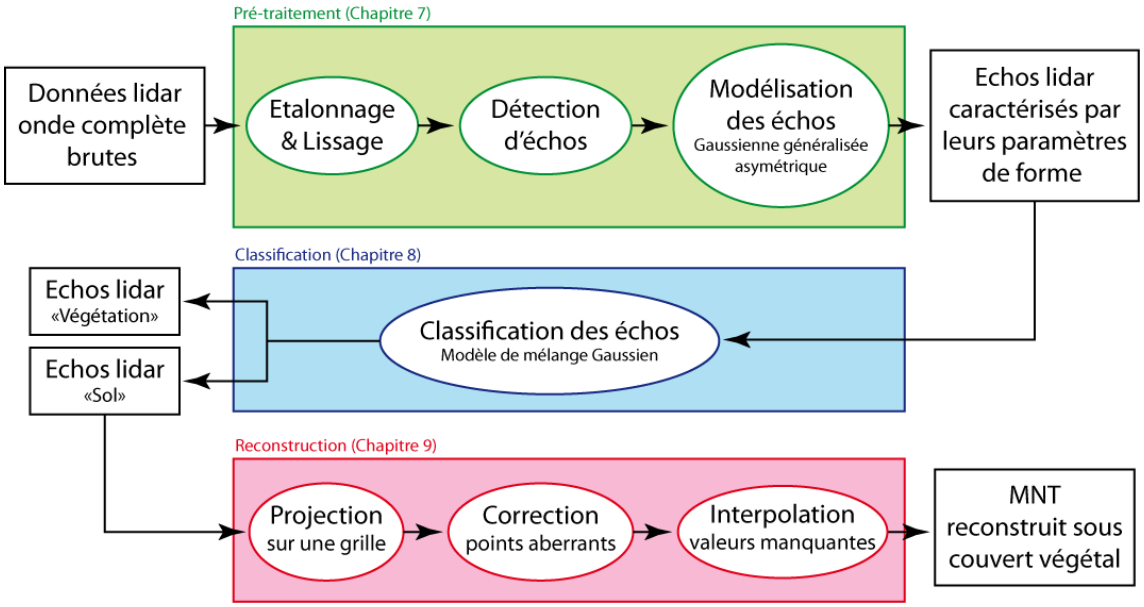


Figure 9.27 – *Schéma de principe reprenant la démarche de traitement des données lidar onde complète depuis leur forme brute jusqu'à la reconstruction d'un modèle numérique de terrain situé sous un couvert végétal.*

partir de ces points 3D. Nous nous sommes intéressés à plusieurs méthodes possibles, et nous avons montré qu'estimer la hauteur du sol par la médiane des altitudes était une méthode pertinente, l'estimation par la hauteur moyenne étant faussée par certains points aberrants issus d'une mauvaise classification. L'estimation de la hauteur du sol par des critères tels que l'altitude minimale des points 3D, ou le dixième centile des altitudes permettent d'ailleurs de s'affranchir de manière plus sûre de ces points aberrants. Ces méthodes présentent par contre l'inconvénient de sous-estimer quasi-systématiquement la hauteur du sol. C'est pourquoi dans ce chapitre, nous avons préféré utiliser une estimation par la valeur médiane.

Dans le cas où la résolution est plus fine (0.5m dans notre cas), les cases de la grille contiennent rarement plusieurs points. Le problème principal est alors posé par des échos du jeu de données qui ont été mal classifiés, et que l'on considère comme appartenant au sol alors qu'ils proviennent de la végétation. Ces points sont à l'origine d'erreurs importantes dans l'estimation de la hauteur du sol. Pour remédier à ce problème, il existe plusieurs approches : il est tout d'abord possible de travailler à l'amélioration de la classification des points 3D. Nous suggérons ici une correction de cette classification en utilisant la reconstruction de la géométrie du couvert végétal. Si une surface définissant le bas de la canopée peut être reconstruite à partir des données lidar, il sera alors possible de corriger la classification des points étiquetés « sol » lorsqu'ils se situent à l'intérieur du feuillage. Un travail complémentaire pourrait être réalisé pour mettre en œuvre une méthode robuste de ce type, n'entrainant pas la suppression d'un trop grand nombre de points correctement classifiés.

Une autre option couramment utilisée consiste à corriger la surface reconstruite en supprimant a posteriori les points considérés comme aberrants. De nombreuses méthodes élaborées existent pour cela et leur implémentation pourrait être étudiée. Dans le cadre et les délais de ce travail de thèse, nous avons choisi de mettre en place une méthode plus simple. Cette méthode consiste en une suppression des points du MNT sur la base d'une limitation de la

pente maximale possible. Bien que simple, cette méthode nous a permis de corriger de façon satisfaisante la plupart de nos reconstructions. Nous sommes néanmoins conscients de ses limitations, en particulier si le terrain possède naturellement des pentes importantes.

Dans ce chapitre, nous avons également montré que l'utilisation de visées inclinées induisait un plus grand nombre de ces points aberrants. Nous supposons qu'ils sont dûs aux troncs et aux branchages des arbres qui sont moins visibles en visée nadir, et qui, de par leur nature, sont susceptibles d'induire une erreur de classification en produisant des échos lidar onde complète de formes similaires aux échos de sol.

Dans la deuxième partie du chapitre, nous abordons le sujet de la combinaison des visées multi-angulaires. Nous nous plaçons ici dans la situation idéale où les différents jeux de données sont parfaitement co-localisés, ceci afin d'évaluer la pertinence d'une telle technique pour la pénétration sous feuillage.

Nous choisissons ici de réaliser la combinaison des jeux de données après que chacun ait été classifié indépendamment. Ceci nous permet de ne pas avoir à considérer les différences d'amplitude ou de forme des échos liées à l'utilisation des angles de visées différents. Grâce à la simulation d'une configuration où un scanner aéroporté observe la même zone de forêt en un passage, d'abord vers l'avant, puis au nadir, et enfin vers l'arière ($+30^o$, 0° et -30°), nous montrons ici que la combinaison des trois jeux de données permet d'apporter des informations supplémentaires, et donc d'obtenir une meilleure couverture de la zone observée. La qualité des reconstructions est donc améliorée pour des résolutions de 2m ou 1m, mais la présence de points aberrants dans les jeux de données acquis en visées inclinées reste trop problématique pour les résolutions plus hautes (0.5m dans notre cas).

Afin de travailler à l'amélioration des reconstructions à ces résolutions sub-métriques, nous proposons d'utiliser les données acquises lors d'une première observation de la scène en visée nadir pour évaluer la direction la plus pertinente pour l'observation d'une zone limitée (5m$\times$5m dans notre exemple). L'étude de la distribution des échos lidar issus de la végétation présents au dessus de la zone d'intérêt nous permet de choisir une direction d'observation supposée offrir un couvert végétal moins dense. Nous montrons ensuite qu'une acquisition réalisée sous la visée optimisée choisie permet d'améliorer efficacement la couverture de la zone choisie, et donc la reconstruction du terrain à cet endroit.

Chapitre 10

Conclusions et perspectives

Sommaire

10.1 Conclusions 169
10.1.1 Première partie : le modèle DELiS 169
10.1.2 Deuxième partie : mise en place d'une méthode de reconstruction de MNT sous couvert végétal 171
10.2 Perspectives 174
10.2.1 Améliorations du modèle DELiS 174
10.2.2 Reconstruction des MNT et des couverts végétaux 175
10.2.3 Nouvelles applications du modèle DELiS 178

10.1 Conclusions

10.1.1 Première partie : le modèle DELiS

Afin d'aller vers l'objectif final de la thèse, l'évaluation de l'apport de visées multi-angulaires pour la reconstruction des modèles numériques de terrain (MNT) sous couvert végétal, nous avons choisi une approche par modélisation directe. Nous avons donc cherché dans un premier temps à nous doter d'un simulateur de lidar onde complète qui pourra nous permettre de simuler l'observation de couverts végétaux sous lesquels nous aurons placé un modèle numérique de terrain de référence.

Etat de l'art et spécifications pour le modèle de lidar onde complète

La première partie du travail de thèse a donné lieu à une étude préliminaire de la physique de la mesure lidar onde complète et à un état de l'art des approches de modélisation existantes. Grâce à ce travail, nous avons pu formuler des exigences en termes de temps de calcul, de précision physique de la modélisation et de capacité à prendre en compte des scènes de végétations réalistes. Nous avons formulé les besoins suivants :

- Le modèle de lidar onde complète doit être capable de simuler les diffusions multiples dans les feuillages, de tenir compte des effets possibles de l'atmosphère et du soleil sur le signal lidar, et de simuler la détection et l'amplification du signal lidar par un instrument réaliste.
- Il doit être possible de simuler l'observation de modèles de végétation hétérogène réalistes à une échelle inférieure aux dimensions de l'empreinte laser typique d'un scanner laser aéroporté, soit quelques dizaines de centimètres.

– Les surfaces modélisées doivent pouvoir être décrites par des propriétés optiques réalistes.
– Le temps de calcul nécessaire à la simulation d'un signal lidar doit être inférieur à 30 secondes de manière à pouvoir simuler l'observation de zones de forêt étendues avec une densité de mesures lidar réaliste (typiquement entre 4 et 10 points par mètre carré).

Développement du modèle DELiS

Au vu de ces spécifications, après étude des solutions existantes et test des modèles disponibles, nous avons opté pour le développement d'un nouveau modèle pour la simulation de la mesure lidar onde complète.

Le modèle DELiS (nDimensionnal Estimation of Lidar Signals) utilise le logiciel libre de lancer de rayon LuxRender. L'algorithme de path-tracing lui permet de traiter efficacement des géométries maillées de plusieurs centaines de milliers de facettes avec des temps de calcul optimisés. Nous avons apporté quelques modifications mineures à l'algorithme de path-tracing de sorte qu'il puisse être utilisé pour la simulation du lidar onde complète.

Le moteur de calcul de la propagation de l'impulsion laser dans une géométrie complexe est couplé avec le modèle de transfert radiatif Modtran pour le calcul de la transmission atmosphérique le long de la ligne de visée, et pour l'estimation du signal mesuré par le lidar et issu de la réflexion sur le sol de l'éclairement solaire et du fond de ciel.

DELiS est également muni d'un module « instrument » permettant de modéliser le signal mesuré en sortie d'instrument à partir du flux lumineux collecté par une photodiode à avalanche tout en tenant compte des bruits de mesure, d'amplification et de numérisation.

Le modèle DELiS est donc un outil complet de simulation du lidar onde complète. Sa flexibilité lui permet de modéliser aussi bien des instruments aéroportés, utilisation pour laquelle il a été développé, que des scanners laser terrestres. Sa capacité à travailler avec des scènes comportant un très grand nombre de facettes lui permet également de simuler l'observation de scènes de végétation par un système satellitaire.

Validation du modèle DELiS

Une validation préliminaire du modèle DELiS a ensuite été mise en place en trois étapes. Tout d'abord la comparaison des résultats de simulations DELiS avec des résultats calculables analytiquement dans le cas de cibles simples (plan de réflectance Lambertienne, surfaces semi-transparentes, ...) a permis de s'assurer que le simulateur respecte les principes de bases de la mesure lidar onde complète.

Dans un deuxième temps, nous avons comparé les simulations réalisées avec DELiS dans le cas d'une couche de végétation plane homogène avec un modèle analytique dont le calcul est développé dans le chapitre 6. Cette vérification nous a permis de vérifier que DELiS restitue précisément un signal lidar onde complète pour une scène de végétation.

Enfin, nous avons mis en place les méthodes et équipements nécessaires à la validation expérimentale de notre modèle. Afin de surmonter la difficulté de modélisation inhérente à l'effort de comparaison d'un modèle de lidar onde complète à des données réelles sur végétation, nous avons conçu et fait réaliser une série de mires spéciales afin de générer des signaux lidar onde complète déformés tout en maîtrisant parfaitement la géométrie de la cible. Il nous sera alors possible de comparer les simulations DELiS aux signaux réels en disposant d'une très bonne modélisation des cibles réelles.

Une campagne de mesures préliminaires a été réalisée et nous a permis de constater que le fonctionnement précis des instruments commerciaux reste mal compris, en raison surtout du peu d'informations communiquées par les fabricants. En particulier, l'instrument utilisé (Riegl VZ-1000) ne nous a pas permis d'enregistrer tous les signaux en mode « onde complète ». Il enregistre uniquement les signaux présentant une déformation importante par rapport à l'impulsion laser émise. Cette caractéristique, à laquelle s'ajoutent une fréquence d'échantillonnage des signaux de sortie assez faible, et un manque d'information sur la façon dont le système génère des nuages de points à partir de l'information « onde complète » nous a empêché de mener à bien les essais prévus.

Afin de finaliser la validation expérimentale du modèle DELiS, il sera nécessaire de mieux caractériser l'instrument utilisé afin de mieux appréhender ses caractéristiques (durée et énergie de l'impulsion laser émise par exemple), et d'être capable de modéliser son fonctionnement de façon plus précise. Il faudra également concevoir un mode opératoire permettant de valider le modèle DELiS malgré la limitation d'enregistrement des signaux inhérente à l'instrument.

Modélisation d'une scène de végétation réaliste

Enfin, afin d'utiliser DELiS sur des scènes réalistes, nous avons fourni un effort de modélisation de la végétation. A partir des données communiquées par le JRC dans le cadre de l'initiative de comparaison de modèles de transfert radiatif RAMI, nous avons mis au point un modèle de forêt réaliste utilisable avec le modèle DELiS. Ce modèle de forêt représente une forêt de peupliers située à Järvselja (Estonie). Il nous a permis de démontrer les capacités du modèle DELiS pour la simulation de la mesure lidar onde complète d'une scène de végétation réaliste de dimensions respectable (un hectare de forêt).

Le modèle DELiS est en effet capable d'utiliser, pour la simulation d'un signal lidar unique, un modèle de scène comportant jusqu'à 3 millions de facettes pour une simulation durant quelques minutes [1] (limitation liée à la mémoire vive de l'ordinateur utilisé et au temps de chargement en mémoire de la géométrie). Par contre, dès lors qu'un très grand nombre de simulations est nécessaire, par exemple pour la simulation du scanner laser aéroporté, le nombre maximal de facettes dans les scènes ne doit pas dépasser 200000 de sorte que le temps nécessaire à la simulation d'un signal n'excède pas les 20 secondes.

Pour parvenir à simuler l'observation de la forêt de Järvselja au moyen d'un scanner laser aéroporté procédant à l'acquisition de plusieurs dizaines de milliers de signaux, nous avons mis en place un algorithme de construction dynamique de la scène permettant de n'inclure au cours de chaque simulation que les arbres nécessaires. Grâce à cette fonctionnalité, il nous sera possible par la suite d'utiliser le modèle de forêt de Järvselja au dessus d'un modèle numérique de terrain quelconque que nous pourrons tenter de reconstruire.

10.1.2 Deuxième partie : mise en place d'une méthode de reconstruction de MNT sous couvert végétal

Dans la deuxième partie de la thèse, nous avons élaboré une méthode de traitement des données lidar onde complète permettant d'aboutir, en partant des signaux lidar, à la reconstruction d'un modèle numérique de terrain situé sous un couvert végétal. Cette méthode de reconstruction procède en trois étapes : modélisation des signaux lidar par échos, classification des échos et reconstruction du MNT. Nous avons ensuite évalué la combinaison de visées multi-angulaires et montré la possibilité d'optimiser le choix des angles de visées.

1. Utilisation de DELiS sur une station de travail, mémoire vive : 4Go, processeur Intel Core 2 Duo 3GHz

Modélisation des échos lidar onde complète

Après un pré-traitement (étalonnage éventuel, lissage), les signaux lidar sont découpés en une série d'échos. Nous avons pour cela choisi de nous limiter à une méthode simple par seuillage en complétant les parties des échos détectés inférieures au seuil. Cette méthode a été plus aisée dans sa mise en œuvre que les méthodes plus poussées existantes. De plus, elle nous a permis de traiter les signaux lidar avec des temps de calcul très brefs et nous avons jugé qu'elle produisait des résultats de qualité suffisante dans le cadre de notre étude. Une fois les échos lidar séparés, nous avons modélisé leur forme par un modèle Gaussien généralisé asymétrique. L'ajout d'un paramètre pour la description du caractère asymétrique des échos lidar rencontrés dans le cas de scènes de végétation est une nouveauté par rapport aux modèles existants.

Classification des échos lidar

La deuxième étape de traitement consiste à séparer les échos lidar provenant du sol de ceux provenant de la végétation. Afin de nous démarquer des méthodes de classification supervisée de type SVM (support vecteur machine) existantes, nous avons proposé une méthode de classification non-supervisée par modèles de mélange Gaussien. Cette méthode nous a permis d'obtenir de bons résultats pour la classification en deux classes « sol » et « végétation » des données lidar simulées sur la forêt de Järvselja avec DELiS (κ de Cohen supérieur à 0.8) comme pour les données réelles acquises par l'IGN sur la ville d'Amiens (κ de Cohen supérieur à 0.7).

Reconstruction du MNT

Nous avons alors pu procéder à la reconstruction de la géométrie du terrain à partir des échos lidar identifiés comme provenant du sol. Pour cela, nous avons choisi d'utiliser une méthode classique de projection du nuage de points sur une grille régulière. Cette méthode a été utilisée avec différents jeux de données simulés avec DELiS sur la forêt de Järvselja, et pour lesquels nous disposons donc d'une référence précise pour le modèle numérique de terrain.

Elle nous a permis de mettre en évidence que les facteurs conditionnant de façon la plus importante la qualité des reconstructions, quelle que soit la résolution du MNT réalisé, sont la quantité d'information disponible au sol (i.e. le nombre d'échos de sol disponibles), sa répartition (i.e. la couverture de la zone) et la fiabilité de la classification. Ainsi, l'effet principal du couvert végétal sur la reconstruction du MNT est l'occultation de certaines zones pour lesquelles il faut alors, faute d'information, interpoler le MNT.

Le second effet négatif du couvert végétal réside dans les erreurs de classification. Si un écho provenant du sol est classifié à tort comme un écho de végétation, il en résulte une perte d'information. Si un écho de végétation est classifié à tort comme du sol, cela introduit une donnée aberrante. Nous avons montré que ces erreurs de classification sont particulièrement présentes lorsque l'acquisition des données lidar est réalisée avec des visées inclinées. Dans ces situations, les troncs et les branchages des arbres sont plus visibles, et ils produisent des échos lidar similaires à des échos provenant du sol.

Nous avons montré que ces erreurs pouvaient être corrigées moyennant un lissage de la surface reconstruite, mais la performance des méthodes utilisées dans le cadre de la thèse n'a tout de même pas permis de s'affranchir totalement des points aberrants. Ces considérations

nous conduisent à recommander, dans le cas de reconstructions à partir d'une acquisition unique, de limiter au maximum l'inclinaison des lignes de visée.

Dans le cas de l'observation en visée nadir, nous sommes parvenus à réaliser des reconstructions de MNT sous couvert végétal avec une erreur quadratique moyenne de 18cm à 35cm selon la résolution testée (respectivement 2m et 0.5m). Ces valeurs sont légèrement meilleures que celles obtenues en conditions réelles, ce qui est cohérent si l'on tient compte du fait que le modèle utilisé dans DELiS présente un sol nu. La présence d'objets au sol ou de végétation basse vient en effet perturber les mesures en conditions réelles.

Combinaison de visées multi-angulaires

Dans un dernier temps, grâce à la simulation avec DELiS de l'observation de la forêt de Järvselja sous trois angles différents (30° vers l'avant, visée nadir et 30° vers l'arrière) nous avons pu montrer que malgré les erreurs de classification induites par l'inclinaison des lignes de visée, il est possible de combiner des acquisitions multi-angulaires afin d'améliorer la qualité finale de la reconstruction du MNT. La combinaison des points de vue améliore la couverture de la zone observée en apportant plus d'informations sur la surface du sol. L'utilisation de visées différentes offre également une chance d'observer les parties du sol qui étaient occultées par le couvert végétal.

Grâce à l'apport supplémentaire des visées inclinées, nous montrons que, pour des reconstructions à des résolutions de 2m et 1m, l'erreur quadratique moyenne peut être améliorée respectivement de 9cm (19cm au lieu de 28cm) et de 7cm (17cm au lieu de 24cm). Par contre, pour une résolution de 0.5m, la combinaison des visées multi-angulaires n'a pas permis, dans notre exemple, d'améliorer la reconstruction, notamment en raison de l'ajout de points aberrants par les visées inclinées et de la difficulté de corriger ces phénomènes à une telle résolution.

Optimisation des angles de visée

Par contre, la stratégie testée (trois observations d'abord vers l'avant, puis au nadir, et enfin vers l'arrière au cours d'un même passage au dessus de la zone) n'est certainement pas optimale au sens où un autre choix pour les points de vue et pour les angles de visée aurait sans doute permis d'apporter encore plus d'informations sur la géométrie du sol.

Dans le but d'améliorer également les reconstructions à une résolution sub-métrique, nous nous sommes donc intéressés à la possibilité d'exploiter l'information contenue dans les échos classifiés comme « végétation » à l'occasion d'un premier passage au dessus de la zone (en visée nadir dans notre exemple) pour choisir une direction d'observation optimale pour l'observation d'une zone précise. Nous avons développé une méthode basée sur l'étude de la distribution des échos de végétation et montré par un exemple que l'addition d'une seconde acquisition, réalisée avec une visée bien choisie, permet d'obtenir de meilleurs résultats pour la reconstruction d'une zone de 5m de coté que la combinaison des trois visées précédemment énoncées, choisies arbitrairement.

10.2 Perspectives

10.2.1 Améliorations du modèle DELiS

Finalisation et validation du modèle

Le premier point de travail à adresser dans le développement du modèle DELiS sera certainement la finalisation de sa validation par la réalisation d'une campagne expérimentale avec un instrument onde complète parfaitement caractérisé. Nous avons au cours de cette thèse mis en place tous les outils et méthodes nécessaires à la réalisation de cette campagne qui permettra d'assurer une validation complète pour DELiS.

En parallèle, il sera possible de travailler sur l'implémentation du modèle de sorte à produire une version robuste, portable sur différents environnements (DELiS fonctionne uniquement sous linux à l'heure actuelle), et distribuable à d'éventuels partenaires. A ce titre, une implémentation complète du modèle en C++ (python actuellement) pourrait être réalisée et un certain nombre de fonctionnalités de DELiS pourraient être améliorées (amélioration des temps de calcul par optimisation des entrées/sorties, optimisation du couplage avec LuxRender, parallélisation des simulations, utilisation de la version GPU de LuxRender, ...).

Renforcement des modules de DELiS

Concernant les aspects scientifiques, l'amélioration et le développement du modèle DELiS pourront être envisagés dans plusieurs axes :

- La prise en compte des phénomènes atmosphériques et du soleil pourra être améliorée, notamment par la simulation de la contribution solaire diffusée par l'atmosphère vers le capteur sans interaction avec la scène. Il semble que ce soit cette contribution qui limite en fait la portée des systèmes pour les faibles visibilités atmosphériques. Sa simulation pourra être réalisée par couplage avec un modèle de transfert radiatif adapté de la même manière que DELiS a été couplé avec Modtran.
- Le modèle d'instrument pourra être perfectionné si davantage d'informations sont obtenues au sujet du fonctionnement des systèmes réels. Il pourra également être possible de prendre en compte d'autres types de capteurs (photo-multiplicateurs par exemple) ou d'autres modes de mesure (comptage de photon).
- S'il on estime que leur prise en compte est nécessaire dans le cadre d'une application particulière, d'autres sources de bruits telles que la scintillation atmosphérique, ou le speckle pourront être prises en compte dans DELiS.
- La modélisation des scènes pourra être poussée plus en avant grâce à une meilleure exploitation des capacités de LuxRender, par exemple pour prendre en compte une BRDF réelle mesurée pour les surfaces de la scène modélisée, ou pour inclure des effets d'atténuation volumique et de diffusions multiples dans des milieux diffusants (brouillard, etc...).

Toutes ces améliorations seront facilitées par les choix de développement qui ont été réalisés pour lors de l'implémentation du modèle DELiS. Nous avons en effet opté pour une implémentation modulaire, de sorte que l'ajout d'un nouveau type de capteur, ou la prise en compte différente de l'atmosphère ou du soleil pourront être implémentés sans avoir à modifier le reste du modèle.

Modélisation de la végétation

La modélisation précise d'une scène de végétation est une tâche complexe. Nous sommes parvenus dans le cadre de la thèse à modéliser de façon suffisamment réaliste une forêt bien particulière, mais un travail important reste à réaliser dans plusieurs domaines :

- Tout d'abord, dans un souci de réalisme, il faudra à l'avenir pouvoir prendre en compte la géométrie du sur-sol. En domaine forestier, il est en effet très rare que la surface du sol soit nue, et l'on peut trouver différents types d'obstacles tels que de la végétation basse (arbres morts, buissons, fougères, etc.), ou éléments géologiques (rochers, crevasses, etc.).
- D'autre part, il apparaît important d'être capable de traiter différents types de couverts végétaux, et l'on pourra s'intéresser aux défis que représentent la modélisation 3D précise à petite échelle de forêts de conifères (arbres dont les modèles 3D nécessitent un très grand nombre de facettes triangulaires) ou de la forêt tropicale (structure très complexe et encore mal connue).

Vers la simulation d'autres techniques d'imagerie active

DELiS a été conçu et développé pour la simulation des signaux lidar onde complète. Il n'en demeure pas moins que ses principes de bases, et en particulier l'algorithme de path-tracing fourni par LuxRender peuvent être utilisés pour servir d'autres objectifs.

Nous avons déjà évoqué la possibilité de modéliser d'autres types de capteurs grâce à DELiS, comme les sytèmes à comptage de photons. Moyennant de plus importantes modifications, ou même le développement d'un autre modèle sur les mêmes principes que DELiS, il pourra être possible de simuler d'autres types de systèmes d'imagerie active.

Il est par exemple possible d'adapter l'algorithme de path-tracing et l'exploitation des données qu'il fournit afin de modéliser un capteur lidar onde complète matriciel. Un tel système procède à la détection et à l'amplification du signal reçu suite à l'émission d'une impulsion laser de la même façon que dans le cas du lidar onde complète mais en utilisant une matrice de détecteurs (des photodiodes à avalanche par exemple). Ces systèmes permettent alors de mesurer en parallèle plusieurs signaux lidar onde complète pour l'émission d'une seule impulsion laser, et leur simulation avec un principe identique à celui du modèle DELiS serait parfaitement réalisable.

En suivant le même principe, il est possible, toujours grâce au path-tracing, de générer des images en lieu et place du signal lidar onde complète. On simulerait alors un système imageur de type flash (acquisition d'une image suite à l'éclairement de la scène par une impulsion laser). L'utilisation des temps de parcours des signaux lumineux permet alors de simuler les systèmes de type « flash gated » qui consiste à limiter l'acquisition de l'image à un certain intervalle de temps.

Il faudra néanmoins considérer des problèmes comme la turbulence ou la scintillation atmosphérique, qui ont un impact non négligeable sur les performances de systèmes d'imagerie active et dont la prise en compte avec DELiS n'est pas évidente.

10.2.2 Reconstruction des MNT et des couverts végétaux

Perfectionnement de la chaîne de traitement pour la reconstruction de MNT sous couvert végétal

Dans le cadre de la thèse, nous avons mis en place une chaîne de traitement des données permettant de reconstruire la géométrie d'un terrain sous un couvert végétal. A de nombreuses reprises, nous avons néanmoins été contraints, travaillant en temps limité, de limiter

la complexité des algorithmes mis en place, et nous avons vu que les méthodes développées n'étaient pas les plus performantes.

Dans le cas où de futurs travaux poursuivraient la démarche initiée dans cette thèse pour la reconstruction des MNT sous couvert végétal, on pourra s'intéresser au perfectionnement des points suivants :

- En premier lieu, la chaîne de traitement développée ici pourra être testée dans des conditions plus variées, avec d'autres types de couverts végétaux, en utilisant un relief plus prononcé, et en complexifiant la modélisation du sur-sol (branchages et troncs au sol, végétation basse, etc ...).
- La séparation des échos lidar et leur modélisation par le modèle Gaussien généralisé asymétrique peut être réalisée de manière plus robuste et performante en mettant en place un algorithme permettant d'approcher directement un signal lidar onde complète par un nombre d'échos automatiquement déterminé. De telles méthodes existent déjà pour d'autres modèles d'échos. Leur adaptation pour le modèle Gaussien généralisé asymétrique devrait s'avérer assez simple.
- La méthode de classification employée dans nos travaux peut certainement être améliorée, et d'autres méthodes pourraient s'avérer plus fiables et plus robustes que les modèles de mélange Gaussien. L'amélioration de la classification pourrait s'avérer cruciale pour limiter le nombre de points aberrants gênant la reconstruction des MNT.
- De la même manière, il sera possible d'utiliser des méthodes plus performantes pour la reconstruction des modèles numériques de terrains et pour la correction des surfaces reconstruites. Nous avons choisi dans la thèse de nous limiter à une méthode simple à la mise en œuvre rapide, et il paraît évident que d'autres méthodes peuvent être plus pertinentes en fonction du contexte et des objectifs.

Etudes de sensibilité

Nous avons vu que les possibilités offertes par le modèle DELiS en termes de variation des paramètres d'acquisition et de scène modélisée pourraient permettre de réaliser quantité d'études de sensibilité. Ainsi il serait intéressant d'évaluer les performances d'instruments possédant différentes caractéristiques (longueur d'onde du laser, fréquence d'échantillonnage, performance du capteur, etc...) et évoluant dans différentes configurations (altitude de vol, densité du scan, etc...) pour l'application particulière qu'est la reconstruction de MNT sous couvert végétal.

Il paraît en effet possible d'optimiser les paramètres des systèmes ainsi que la configuration de vol afin d'obtenir de meilleurs résultats lors des premières étapes de traitement des données, notamment la classification des échos lidar. Ces améliorations auront à coup sûr une répercussion sur la qualité des reconstructions finales. Les étapes de classification et de reconstruction de la surface peuvent aussi être perfectionnées afin d'offrir de meilleures performances globales ainsi qu'une meilleure robustesse aux situations variées pouvant être rencontrées en contexte opérationnel.

En particulier, un porteur comme un hélicoptère ou un drone, volant à plus basse altitude et à vitesse réduite, et donc fournissant une plus grande densité de mesures pourrait produire de meilleurs résultats. Et en contrepartie, un système volant à plus haute altitude, ou utilisant une divergence du faisceau laser plus importante pourrait, en produisant une empreinte laser au sol de dimension plus importante offrir de meilleures performances de pénétration sous feuillage.

Combinaison de visées multi-angulaires

En ce qui concerne la combinaison des visées multi-angulaires, d'autres configurations pourraient être envisagées. On pourra tester différentes configurations des instruments ainsi que d'autres scénarii de survol de la zone à observer comme par exemple :

- Un survol circulaire autour d'une zone produisant plusieurs jeux de données avec la même incidence des lignes de visée par rapport au sol, mais des azimuts différents, ou même l'acquisition de données en continu au cours d'un virage.
- La collaboration entre un système embarqué sur un hélicoptère produisant un jeu de données dense avec une petite empreinte laser et un système embarqué sur un avion produisant un jeu de données moins dense mais avec une empreinte laser plus importante.
- L'acquisition de données multi-angulaires en un seul passage, par exemple grâce à un système de Palmer (qui produit un balayage elliptique) utilisé avec des incidences plus importantes (les systèmes actuelles se limitent à des incidences de $\pm 5^o$).

Enfin, on pourra chercher à tester plus en avant la technique d'optimisation du choix des visées mise au point en fin de thèse. Le temps nous a en effet manqué pour produire davantage de cas de test et mieux apprécier ainsi l'apport d'une telle méthode.

Pistes à explorer

Pendant le développement de notre chaîne de traitement des données, et au fil des essais de reconstruction, nous avons relevé plusieurs problèmes dont l'étude pourrait s'avérer intéressante.

Par exemple, nous avons vu que lors de l'utilisation des visées inclinées, de nombreuses erreurs de classifications apparaissent et perturbent les reconstructions. Nous avons supposé que ces erreurs venaient de l'observation des troncs et des branchages des arbres et nous avons présenté plusieurs méthodes permettant de s'en affranchir. Il pourrait être intéressant de s'interroger sur l'origine exacte de ces points et d'étudier la possibilité d'exploiter ces informations pour, par exemple, compter les arbres présents sur une parcelle de forêt.

Toujours au sujet des erreurs de classification, nous avons initié une méthode de correction de la classification consistant à reconstruire la géométrie du couvert végétal. Une telle reconstruction géométrique du volume occupé par la végétation pourrait avoir bien d'autres applications. La combinaison de cette reconstruction avec une exploitation des informations disponibles sur les échos lidar pourrait mener à d'intéressantes avancées en matière de la caractérisation des couverts végétaux à des échelles sub-métriques. Nous avons en effet exploité ici l'information « onde complète » uniquement lors de l'étape de classification des échos lidar, il est probablement possible de tirer parti de cette information pour servir d'autres objectifs tels que l'estimation de la biomasse par exemple.

A ce titre, il pourrait s'avérer intéressant d'étudier la possibilité de coupler l'observation lidar onde complète des scènes de végétation avec des observations d'autres types comme l'imagerie hyperspectrale ou le radar.

Dans le chapitre 8, nous avons expliqué que la classification basée sur les modèles de mélange Gaussien présente l'avantage d'être non-supervisée. Il est donc possible d'envisager, sous réserve que les systèmes existants progressent en ce sens, une classification « en temps

réel » des données lidar onde complète. En effet, une fois un nombre raisonnable d'échos lidar mesurés, il est possible de modéliser la distribution de leurs paramètres de forme et de les classifier grâce aux modèles de mélange Gaussien. La classification d'un écho lidar est alors directe au sens où il suffit de comparer ses caractéristiques aux classes existantes pour le classifier comme « sol » ou « végétation ». Une telle technique pourrait être simulée et testée grâce au modèle DELiS.

10.2.3 Nouvelles applications du modèle DELiS

La flexibilité du modèle DELiS permet de simuler tout type de scènes au moyen de capteurs très variés, et les pistes à explorer sont très nombreuses. Au cours de la thèse, nous avons pu en suivre quelques unes, et de nombreuses autres questions restent à étudier.

Dimensionnement d'un système lidar satellitaire

Dans le but de concevoir un futur système lidar onde complète satellitaire, il est possible d'envisager deux approches de modélisation.

Tout d'abord, le modèle DELiS pourrait être employé pour la simulation directe de la forme d'onde obtenue lors de l'observation d'une scène de végétation depuis l'espace. Nous avons vu que DELiS est capable de travailler avec des scènes suffisamment étendues et complexes pour permettre une telle utilisation. Il suffirait alors de le coupler à un modèle de propagation atmosphérique adapté à l'observation depuis l'espace et de lui adjoindre un modèle d'instrument en conséquence.

Une autre possibilité est l'utilisation des observations d'un scanner laser aéroporté commercial onde complète (à petite empreinte au sol) pour simuler la forme d'onde qu'observerait un système lidar onde complète embarqué sur un satellite et observant la même scène. Au cours de la thèse, nous avons utilisé le modèle DELiS pour démontrer la faisabilité d'une telle méthode en simulant l'observation de la même scène de végétation par les deux types de capteurs. Dans notre publication (*Ristorcelli* et al. *(2013)*, voir annexe B), nous montrons que l'agrégation des mesures aéroportées permet d'approcher la mesure satellitaire (empreinte au sol de 30m de diamètre), quelle que soit la configuration du scanner laser aéroporté testée (différentes altitudes de vol, donc différentes densités de points au sol, et différentes dimensions d'empreinte laser). Par contre, nous montrons que d'autres paramètres tels que la longueur d'onde laser utilisée peut fortement impacter le résultat. En effet, aux longueurs d'onde pour lesquelles la réflectance des éléments végétaux est importante (1064nm par exemple), les diffusions multiples dans le feuillage ont un impact non négligeable sur le signal lidar acquis par le système satellitaire. Le scanner laser aéroporté, même travaillant à cette longueur d'onde, ne permettra pas de le simuler correctement.

Etude sur l'intérêt de données multi-spectrales pour la classification des échos

Un stage a d'autre part été encadré pendant la durée de la thèse, de mars à juillet 2013. Pendant cette période, G. Leenhardt a utilisé les outils développés dans le cadre de la thèse et travaillé à la modélisation de scènes pour la simulation du lidar multi-spectral. Grâce à l'étude de jeux de données simulés sur des canopées homogènes simples ainsi que sur des parcelles de la forêt de Järvselja, il a pu formuler les conclusions suivantes :

– Des paramètres de forme des échos extraits par le modèle Gaussien généralisé (voir section 7.3.3), seule l'amplitude A des échos varie lorsque la longueur d'onde laser

change. Les paramètres d'asymétrie k et d'élargissement a des échos lidar ne dépendent pas de la longueur d'onde considérée.
- Aux quatre longueurs d'ondes considérées (532nm, 1064nm, 1557nm et 1800nm), la classification des échos lidar par la méthode des modèles de mélange Gaussien donne des résultats équivalent au sens du κ de Cohen.
- A ce stade de l'étude, la combinaison des informations multi-spectrales ne permet pas d'améliorer la classification en deux classes « sol » et « végétation » par la méthode des modèles de mélange Gaussien.
- Par contre, nous avons mis en évidence que les données multi-spectrales pourraient être utilisées pour caractériser les matériaux présents au sol après séparation des échos lidar provenant du sol de ceux provenant de la végétation.

Autres perspectives

Le modèle DELiS est également capable d'apporter un support de simulation à toute étude théorique sur la génération du signal lidar onde complète dans des situations variées.

Il pourrait donc être utile au développement de méthodes d'inversion du signal lidar onde complète pour la caractérisation des couverts végétaux, en fournissant des données lidar simulées à partir d'un couvert végétal parfaitement maitrisé.

Grâce à sa capacité à fournir des jeux de données réalistes à partir d'un modèle 3D de scène parfaitement connu, le modèle DELiS pourrait également être utilisé en milieu urbain, en présence ou non de végétation, toujours dans la même optique de développement, de test ou de validation de méthodes de traitement des données lidar onde complète.

D'autre part, nous avons vu que le problème de modélisation de la végétation est un problème récurrent. Un modèle comme DELiS pourrait fournir des données simulées pour aider à mieux comprendre les paramètres déterminants permettant de décrire une scène de végétation pour la simulation du lidar onde complète.

Nous avons par exemple supposé dans la thèse que les feuilles des arbres pouvaient être assimilées à des triangles de même superficie. Il est possible d'étudier dans quelle mesure une telle hypothèse nuit à la simulation correcte d'un signal lidar onde complète. Autre exemple, les calculs développés dans le cadre du calcul analytique du signal lidar théorique en présence d'une couche homogène de végétation tendent à monter que plutôt que le LAI, c'est le rapport du LAI sur l'épaisseur de la couche de végétation (donc la densité volumique de surface foliaire) qui définit la forme du signal lidar onde complète. Un modèle tel que DELiS peut servir de support à de nombreuses réflexions théoriques de ce type.

Annexe A

Lois de distribution de l'orientation des feuilles

LAD uniforme

C'est la distribution la plus simple qui soit : toutes les orientations $\vec{\omega}(\theta, \varphi)$ sont équiprobables. Cette distribution ne rend pas vraiment compte d'un type de végétal particulier, elle est le plus souvent utilisée par défaut ou pour tester les modèles.

$$LAD(\theta) = \frac{2}{\pi} \tag{A.0.1}$$

LAD sphérique

La distribution la plus utilisée pour la modélisation des forêts de feuillus est la distribution dite « sphérique ». Elle équivaut aux orientations qu'auraient des feuilles uniformément réparties tangentiellement à la surface d'une sphère. On peut également interpréter cette loi en considérant qu'elle décrit une répartition avec une densité de probabilité constante par unité d'angle solide. La densité de probabilité utilisée est :

$$LAD(\theta) = \sin\theta \tag{A.0.2}$$

LAD planophile

La distribution dite "planophile" représente un feuillage au sein duquel les feuilles ont plutôt tendance à être orientées face vers le haut (donc à l'horizontale). C'est le cas par exemple des plantations de soja.
La densité de probabilité utilisée dans ce cas est :

$$LAD(\theta) = \frac{4}{\pi}\cos^2\theta \tag{A.0.3}$$

LAD érectophile

La distribution érectophile représente un feuillage dans lequel les feuilles sont disposées plutôt à la verticale, comme dans un champ de maïs par exemple. On peut utiliser une distribution de densité :

$$LAD(\theta) = \frac{4}{\pi} \sin^2 \theta \tag{A.0.4}$$

LAD plagiophile

Dans une distribution plagiophile, les feuilles ont tendance à s'orienter suivant la diagonale, donc à 45 deg en majorité. On modélise ce phénomène par la loi :

$$LAD(\theta) = \frac{4}{\pi} \sin^2 2\theta \tag{A.0.5}$$

LAD extrémophile

Dans une distribution extrémophile, les feuilles ont plutôt tendance à s'orienter selon les directions extrêmes (0° ou 90°). On utilise la loi :

$$LAD(\theta) = \frac{4}{\pi} \cos^2 2\theta \tag{A.0.6}$$

Coefficients de projection pour les différentes lois

Les valeurs des coefficients :

$$\alpha =< \cos \theta_l >_{LAD}$$

et

$$\beta =< \cos^2 \theta >_{LAD}$$

mentionnés dans la section 6.3.1 sont donnés pour chaque loi de LAD dans la table A.1.

Table A.1 – *Valeurs des coefficients α et β calculées pour les six lois usuelles de LAD.*

LAD	Erectophile	Spheric	Plagiophile	Uniform	Extremophile	Planophile
α	$\frac{4}{3\pi}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{32}{15\pi}$	$\frac{2}{\pi}$	$\frac{28}{15\pi}$	$\frac{8}{3\pi}$
β	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{4}$

Annexe B

Publication parue en 2013

Simulation de signaux lidar onde complète satellitaires à partir de données issues d'un scanner laser aéroporté à petite empreinte pour l'observation de la végétation.

Simulating Space Lidar Waveforms From Smaller-Footprint Airborne Laser Scanner Data for Vegetation Observation.

Thomas Ristorcelli, Dominique Hamoir et Xavier Briottet.

Cette publication a été soumise en septembre 2012 pour un numéro spécial du journal « IEEE, Geoscience and Remote Sensing Letters » (IEEE-GRSL) portant sur les variables biophysiques et les hétérogénéités spatiales dans les paysages ruraux ("Biophysical variables and spatial heterogeneities in agricultural landscapes"), et acceptée pour publication en juillet 2013.

Résumé

Dans cette publication, nous nous proposons de tester grâce au modèle DELiS une méthode de simulation d'un signal lidar onde complète satellitaire à partir d'un jeu de données lidar onde complète acquis par un système aéroporté.

La méthode d'agrégation des données aéroportées testée ici est une moyenne des signaux onde complète pondérée par la position de l'observation aéroportée dans l'empreinte du lidar satellitaire simulé (ceci afin de tenir compte de la distribution Gaussienne de l'intensité laser à l'intérieur du faisceau). Nous testons cette méthode d'agrégation grâce à la simulation avec le modèle DELiS des deux mesures : le scan aéroporté et le signal acquis par le système spatial.

Deux phénomènes sont particulièrement étudiés.

En fonction de l'hétérogénéité de la scène de végétation observée, un mauvais échantillonnage spatial par le scanner aéroporté peut fausser le résultat de l'agrégation, certains détails de la scène n'étant pas observés en aéroporté, mais restant bien visibles par le système satellitaire, dont on supposera dans cette étude qu'il possède un diamètre d'empreinte laser au sol de 30m.

Le scanner laser aéroporté produit en effet une observation d'une scène de végétation au moyen d'une petite empreinte laser (dimensions sub-métriques), observation qui peut avoir été réalisée avec un échantillonnage spatial de la scène incomplet. Dans la publication, nous testons trois altitudes de vol pour un même scanner laser aéroporté, ce qui permet d'évaluer l'impact de la dimension de la tâche laser au sol (40cm, 55cm ou 75cm) ainsi que de la densité de mesures lidar (7.5, 2.8 et 0.8 points par mètre carrré) sur les performances de la méthode d'agrégation.

Afin de tester l'effet de la densité des mesures lidar sur la méthode d'agrégation, nous simulons l'observation de trois scènes de végétation différentes et d'hétérogénéité croissante : un champ de maïs, dont les plants sont régulièrement espacés en lignes serrées ; une plantation d'orangers, dont les arbres sont plus espacés et de géométries plus diverses ; et une parcelle de forêt tropicale présentant des hauteurs et des densités de végétation variées.

Parallèlement, nous évaluons l'impact des diffusions multiples dans le feuillage sur le résultat de la méthode d'agrégation. Nous montrons en effet grâce à une série de simulations avec le modèle DELiS que la part du signal lidar mesuré imputable aux diffusions multiples dans le feuillage est d'autant plus importante que la dimension de la tâche laser est grande. Cet effet s'explique par une plus grande probabilité de collecter les photons diffusés plusieurs fois lorsque le cône d'illumination, et donc le champ de collection, est important. Il en résulte une impossibilité de rendre compte des diffusions multiples par la combinaison d'observations aéroportées à petites empreintes alors que celles-ci pourront avoir un impact non négligeable sur le signal lidar onde complète satellitaire.

Nous étudions cet effet grâce à l'utilisation de deux longueurs d'onde pour le lidar pour lesquelles la végétation possède des propriétés optiques différentes. a $\lambda = 1064$nm, la réflectance et la transmittance sont élevées (typiquement 0.51 et 0.40 respectivement) ce qui provoque des diffusions multiples plus importantes qu'à $\lambda = 1557$nm, longueur d'onde pour laquelle la réflectance et la transmittance des feuilles sont plus faibles (0.22 et 0.17 respectivement) et donc à laquelle on observe moins de diffusions multiples.

Les simulations DELiS sur les trois scènes de végétation, dans les trois configurations de vol pour le scanner laser aéroporté, et aux deux longueurs d'onde permettent d'apporter plusieurs éléments de conclusion :

Tout d'abord la méthode d'agrégation par moyenne pondérée des signaux acquis par le scanner aéroporté permet bien de reproduire le signal observé par le capteur spatial. On trouve en effet de très bonnes corrélations entre le signal agrégé et le signal satellitaire simulé ($r^2 > 0.9$ dans tous les cas).

Les trois configurations de vol pour le scanner aéroporté donnent des résultats de qualité similaire pour les trois scènes testées, ce qui conduit à penser que l'échantillonnage spatial des scanners aéroportés commerciaux est suffisant pour permettre la simulation d'un système lidar onde complète spatial.

Par contre, les diffusions multiples dans la végétation semblent être à l'origine d'une erreur non négligeable lors du processus d'agrégation. Pour une longueur d'onde laser de 1064nm (à laquelle les diffusions multiples sont les plus importantes), on observe en effet une erreur quadratique moyenne de 15% à 30% sur l'énergie totale mesurée, alors que cette erreur est inférieure à 10% lorsque l'on utilise une longueur d'onde de 1557nm. Cette erreur peut s'avérer significative lorsqu'il s'agira de dimensionner un futur capteur spatial. Il conviendra d'être prudent afin de ne pas sous-estimer l'intensité des signaux mesurés.

This article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal. Content is final as presented, with the exception of pagination.

Simulating Space Lidar Waveforms From Smaller-Footprint Airborne Laser Scanner Data for Vegetation Observation

Thomas Ristorcelli, Dominique Hamoir, and Xavier Briottet

***Abstract*—A possible step in dimensioning future space-based full-waveform lidar sensors is to predict space signals from commercial airborne laser scanner data. This method has proved able to simulate passive satellite sensors with precise accounting of the scene heterogeneity effects. In this letter, we use the DELiS code (n-Dimensional Estimation of Lidar Signals) to numerically evaluate a simple, efficient aggregation method for combining airborne lidar measurements (submeter footprints) into space lidar signals (decametric footprints). Two main sources of error are studied: the heterogeneity of the scene combined with an insufficient coverage by the airborne scanner, and the multiple scattering of the laser pulse in vegetation. It is found that for three different types of vegetation (corn, orchard, rainforest), and in three usual scanning configurations, the satellite signal can be derived with good precision. However, multiple scattering in the vegetation is shown to induce errors of up to 30% of the total backscattered signal depending on the wavelength.**

***Index Terms*—Airborne laser scanner, fullwaveform lidar, multiple scattering, optical radar, satellite lidar, vegetation.**

I. Introduction

A. Objectives and Motivations

As ONE of the few systems capable of directly measuring the 3-D-structure of vegetation, lidar is a promising remote sensing technique for forest study, characterization, and monitoring. The usefulness of lidar for forest structure measurement and for large-scale biomass estimation has been widely demonstrated for various types of forests [1] and [2]. For a global survey, satellite-based systems are preferred. However, the Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) sensor, onboard the ICESat mission from 2003 until end of 2009 is the only space-based instrument designed for continental surface remote sensing. It led to studies for estimating the biomass [3] and forest structure at regional scale [4]. But GLAS was not initially designed for vegetation characterization, and under-estimations of tree height in tropical rainforest have been reported [5], mainly because of the large size of the GLAS footprint (70 m in diameter). Due to the high costs of such missions, other projects dedicated to space lidars for vegetation like the Vegetation Canopy Lidar (VCL) [6] or the DESDynI [7] missions were cancelled.

When it comes to designing future space-based lidar missions, the simulation of the measured signal is a key problem. It can be addressed by different methods. A first idea was implemented for the VCL mission. The Land Vegetation and Ice Sensor (LVIS) [8] system is an airborne simulator designed to fit the characteristics of the satellite sensor. Even if the data acquired with LVIS were widely used for other purposes than sensor dimensioning [9], designing such a specific system is quite expensive. Another idea would be to numerically simulate the full-waveform lidar measurement of vegetation from space. The main difficulties lie in the lack of precise 3-D models for vegetated areas. A compromise could be to use full-waveform lidar data acquired by a real airborne scanner to simulate the observation of the same scene by a satellite sensor. This method is often used for designing passive space-based sensors [10].

Airborne lidar systems are indeed much more accessible to scientists as several commercial full-waveform systems are available [11]. Flying at an altitude from 500 m to 2000 m, these systems are preferred for altimetry and remote sensing of urban areas [12] as they have a much smaller footprint (the projection of a single emitted laser pulse on the ground, from 0.2 m to 0.8 m diameter). Their use for simulating a space-based lidar measurement would therefore require the aggregation of the small-footprint waveforms into a large footprint signal. To our knowledge, such an aggregation method has never been tested for full-waveform lidar. In this letter, we intend to assess the accuracy of a simple aggregation method by simulating both airborne and sattelite lidar observations of the same vegetation cover.

Fig. 1 presents the two key aspects of vegetation laser scanning that we are adressing: scene coverage and multiple scattering. The larger the lidar footprint is, the higher the probability for a photon to be collected after multiple scattering is. For this reason, large footprint instruments such as spaceborne lidars are more impacted by multiple scattering than small-footprint airborne laser scanner. Depending on the flight conditions (plane speed and altitude), the laser scanner produces a different sampling of the scene. Different footprint dimensions and spacing can result in an insufficient sampling of the large satellite lidar footprint by the airborne small-footprint instrument.

To study the impact of these two factors on the aggregation method, we use the full-waveform lidar model n-Dimensional

Manuscript received September 26, 2012; revised March 5, 2013 and June 25, 2013; accepted July 9, 2013.

T. Ristorcelli is with the Magellium, 31520 Ramonville Saint-Agne Cedex, France, ONERA—The French Aerospace Lab, 31055 Toulouse, France and also with the Université de Toulouse, Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace (ISAE), 31055 Toulouse, France.

D. Hamoir and X. Briottet are with ONERA—The French Aerospace Lab, 31055 Toulouse, France.

Digital Object Identifier 10.1109/LGRS.2013.2273801

1545-598X/$31.00 © 2013 IEEE

This article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal. Content is final as presented, with the exception of pagination.

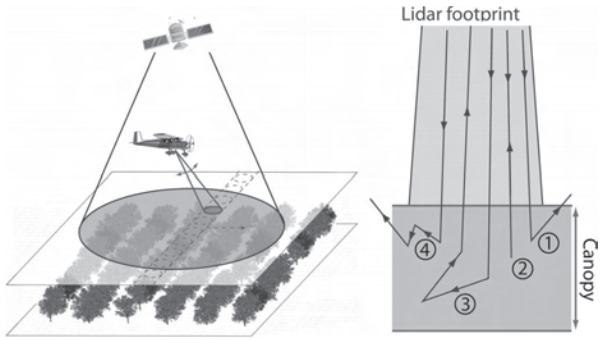


Fig. 1. Illustration of the problematic of scene coverage by the airborne scanner (left) and of the phenomena involved in the backscattering of the laser pulse in a canopy (right). (1) Lost direct scattering; (2) collected direct backscattering; (3) collected multiple scattering; and (4) lost multiple scattering.

Estimation of Lidar Signals (DELiS) [13] to simulate the observation of a given vegetated area by an airborne laser scanner and by a satellite-based sensor. We run simulations on three simple scenes representing different levels of geometric heterogeneity for the vegetation (different vegetation types, densities and vertical and horizontal distributions). The scenes are observed in three laser scanner configurations producing different coverage in terms of footprint size and point density on the ground and at two different lidar wavelengths.

B. DELIS Model

DELiS [13] is a Monte Carlo path-tracing model for simulating full-waveform lidar systems. It samples the light paths in the scene and is thus able to simulate the multiple scatterings of the laser pulse photons through complex geometries such as vegetation covers. DELiS has been specifically designed for the simulation of vegetated areas. It is able to work on meshed geometries of several millions of triangles on a standard workstation.[1] DELiS is capable of simulating small-footprint (centimeter-scale diameter) as well as large footprint (diameter up to several decameters) lidar systems in any viewing configuration (spaceborne, airborne, ground-based).

The model has been validated against analytical results on simple geometries such as tilted planes and on homogeneous random vegetation layers [13]. It has also been successfully compared to the Discrete Anisotropic Radiative Transfer (DART) lidar model [14].

C. Canopy Structure Models

In this letter, the performance of the aggregation method is assessed on three different vegetation scenes: a corn field, a citrus orchard and a tropical forest. These scenes have been designed to provide various vegetation types, heights, and levels of heterogeneity at different scales.

The corn field is a good example of low, homogeneous vegetation. We simulated an area of size 50 m $\times$ 50 m populated with a 3-D corn plant model provided by [15]. The corn plants are all identical, but randomly rotated around their vertical axis. They are planted in a 0.8 m $\times$ 0.8 m spacing grid. The height of the resulting scene is approximately 2.1 m. As part of the RAMI initiative [16],[2] the Joint Research Center (JRC) provides precise 3-D vegetation models. We use these data to model the Wellington citrus orchard. The heights of the 10 different individual trees of the *Citrus sinensis* species range between 2.8 and 4 m, with crowns of average leaf area index (LAI) of 3.8 and spherical leaf angle distribution (LAD). The trees are planted in a 4 m $\times$ 4 m grid.

Finally, the Allostand model [17] developed by UMR AMAP,[3] is used to produce a simplified tropical forest structure based on available data from standard forest measurement in a study site located in Malaisia (Pasoh Forest Reserve) [18]. The result is a distribution of 216 ellipsoidal trees containing a random homogeneous distribution of triangular leaves for which density, ρ_{leaves}, was chosen to fit the commonly accepted LAI value of 8 for the rainforest [19]. The maximal height of the canopy is approximately 30 m.

To differentiate between the influence of vegetation structure and that of leaf optical properties, we use the same generic optical properties for the three scenes. The leaves are modeled as semi-transparent surfaces with a Lambertian reflectance r_{leaf} and a Lambertian transmittance t_{leaf} computed based on the PROSPECT model [20]. The ground is a planar surface with a Lambertian reflectance r_{ground}. The values used for these optical properties are given in Table I for standard lidar wavelengths $\lambda = 1064$ nm and $\lambda = 1557$ nm.

TABLE I
LAMBERTIAN REFLECTANCE r_{leaf} AND TRANSMITTANCE t_{leaf} FOR LEAVES AT TWO COMMON LIDAR WAVELENGTHS (FROM PROSPECT MODEL [20]). GROUND REFLECTANCE r_{ground} OF DARK BROWN CLAY FROM ASTER DATABASE. WOOD REFLECTANCE r_{wood} (TRUNK AND BRANCHES) FROM MEMOIRES [21] DATABASE

λ	r_{leaf}	t_{leaf}	r_{ground}	r_{wood}
1064nm	0.51	0.40	0.29	0.56
1557nm	0.22	0.17	0.35	0.52

TABLE II
AIRBORNE LASER SCANNER CONFIGURATIONS BASED ON THE DATASHEET FOR RIEGL LMS Q680-I FOR AN AIRPLANE SPEED OF 41m.s^{-1}

Name	Meaning	Values			Units
PRR	Pulse Repetition Rate	80	200	400	kHz
H	Flying height	1500	1100	800	m
d_g	Ground point density	0.8	2.8	7.5	pts/m^2
Φ_{FP}	Footprint diameter	0.75	0.55	0.40	m

II. SIMULATED DATASETS

In the following, the lidar signals are expressed as a function of the distance, R, separating the sensor from the location where each portion of the signal has been backscattered along the line-of-sight. On the figures, we use the height above the ground, $H = H_{plane} - R$, so that the signals can be easily compared. For the same purpose, the lidar intensity is normalized by the laser irradiance on the ground, so that the signals from different plane altitudes, and from the satellite sensor, can be compared despite the $1/R^2$ geometric attenuation.

[1] CPU: dual core 3 GHz; RAM: 4 GB

[2] RAdiation transfer Model Intercomparison

[3] AMAP is a research unit dedicated to plant architecture studies.

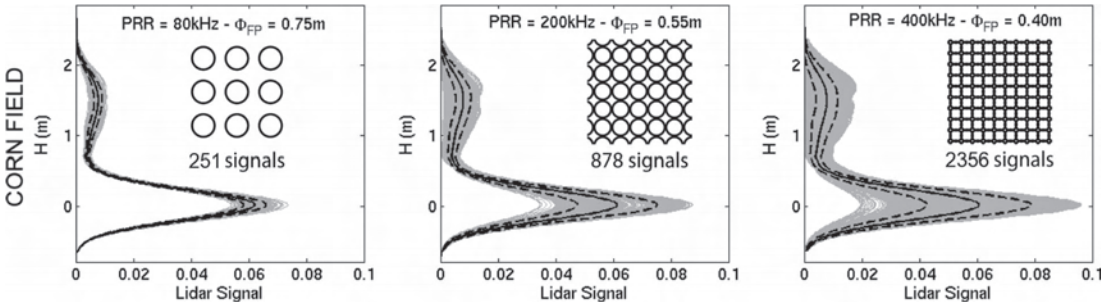


Fig. 2. Small-footprint airborne laser scanner data sets for each configuration (from left to right, $PRR = 80$ kHz, $PRR = 200$ kHz, $PRR = 400$ kHz) on the corn field at a wavelength of $\lambda = 1557$ nm. The solid line represents the average signal, the dashed lines are the average signal plus or minus the standard deviation. The circles represent the small-footprint airborne scanner scan pattern on the ground on an area of 2 m × 2 m.

TABLE III
CUMULATIVE, STANDARD DEVIATION RELATIVE TO THE MEAN VALUE OF THE SIMULATED SMALL-FOOTPRINT DATASETS ON EACH SCENE AND FOR EACH SCANNER CONFIGURATION, AT TWO WAVELENGTHS

	PRR (kHz)	80	200	400
Corn field	$\lambda = 1557nm$	9%	25%	34%
	$\lambda = 1064nm$	12%	29%	40%
Citrus Orchard	$\lambda = 1557nm$	88%	93%	97%
	$\lambda = 1064nm$	108%	116%	132%
Tropical forest	$\lambda = 1557nm$	137%	162%	192%
	$\lambda = 1064nm$	135%	160%	191%

A. Small-Footprint, Airborne DataSets, and Scene Coverage

For airborne laser scanner simulation, we use instrumental parameters corresponding to the Riegl LMS Q680-i [22]. This instrument is equipped with a laser at a wavelength of $\lambda = 1557$ nm. We also used this instrument parameters to simulate the signal at a wavelength of $\lambda = 1064$ nm. The laser emits a laser pulse of duration at full-width-half-maximum $\tau_{pulse} = 3$ ns in a laser beam, the divergence of which is $\theta = 0.5$ mrad. The sensor collects the backscattered signal in a field of view of $\theta_{view} = 1.5\,\theta$. The laser scanner is able to work in different configurations offering different laser pulse repetition rates (PRR) and altitudes of flight, and thus different footprint sizes and point densities on the ground. Table II presents the three configurations selected to test different scanning patterns of the vegetated areas. Fig. 2 presents the simulated small-footprint lidar data set for the corn field. The results obtained on the two other scenes are very similar. $\lambda = 1064$ nm provides a higher signal level and a larger dispersion around the average signal. For all three scenes and each wavelength, Table III shows the relative standard deviation of each data set computed as

$$\sigma_{tot,rel} = \frac{\int \sigma(R)dR}{\int \overline{s}(R)dR} \tag{1}$$

where $\sigma(R)$ is the standard deviation signal and $\overline{s}(R)$ the average signal.

Depending on the nature of the scene and the airborne lidar footprint dimension, various situations are encountered. On Fig. 2, it can be seen that the dispersion of the ground echo amplitude for the corn field is higher when the lidar footprint is the smallest. This is due to a footprint diameter smaller than the corn plants. The airborne lidar with a footprint of diameter 0.40 m can either hit a corn plant, or only the ground, whereas the airborne lidar with a footprint of diameter 0.80 m will almost always hit some plants and some ground. That is why different scan configurations (point density on the ground and footprint size) show different distributions, with higher standard deviations growing when the footprint diameter is smaller.

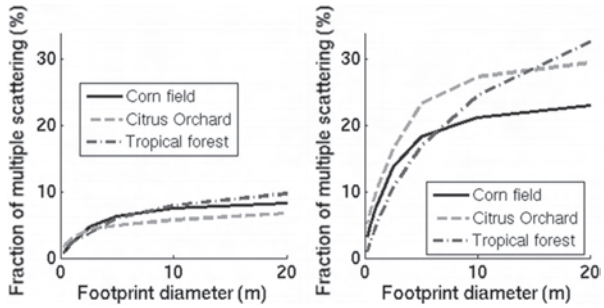


Fig. 3. Fraction of multiple scattering in the total backscattered signal with respect to the footprint diameter at $\lambda = 1557$ nm (on the left) and $\lambda = 1064$ nm (on the right).

B. Large-Footprint Signals and Multiple Scattering

The satellite-based full-waveform lidar that we simulate with DELiS has a footprint diameter of 20 m (a beam divergence $\theta_{beam} = 0.4$ mrad, an instantaneous field of view of $\theta_{view} = 1.5\,\theta$, and a flight altitude of $H = 500$ km) Pang *et al.* [23] suggest that this range of footprint size is optimal for forest height estimation. The other parameters of the simulated satellite lidar, like the wavelength λ and the emitted pulse width, are bound to be identical to the airborne laser scanner parameters.

The large-footprint signals have been simulated by accounting for radiance scattered up to seven times. After six to nine scatterings, the contributions can indeed be neglected according to North *et al.* [24] and based on our own verifications.

With the DELiS model, we can separate the intensity contributions from the different scattering orders (i.e., the contributions of radiance that was scattered n times in the scene before reaching the sensor). Fig. 3 shows the impact of the footprint diameter on multiple scattering. The importance of multiple scattering decreases drastically when using submeter footprints. This is due to photons exiting the field of view of the sensor when they are multiply scattered. The larger the footprint, the higher the probability for a multiply scattered photon to be collected. These results tend to show that the direct aggregation of small-footprint signals will not be able to account for multiple

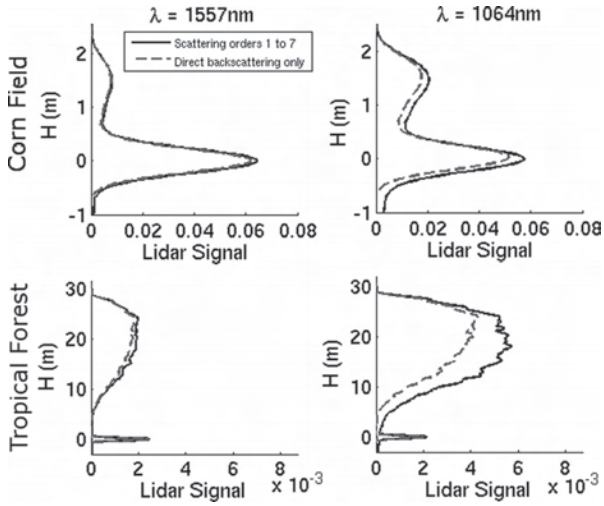


Fig. 4. Large footprint lidar signals ($\Phi_{FP} = 20$ m) for both wavelengths on the corn field and on the tropical forest. The citrus orchard simulations are very similar and are therefore not displayed here. The complete simulated signal (scattering orders 1-7) (full line) is compared to the signal simulated with first order scattering only (dashed line).

scattering. The multiple scattering information is indeed absent in sub-metric signals, but represents a considerable part of large footprint signals. The error involved here varies from 5% to 9% of the total signal at a wavelength of $\lambda = 1557$ nm and can reach up to 30% for $\lambda = 1064$ nm.

Fig. 4 shows the simulated signals for the three scenes for both wavelengths. The signals simulated with up to seven scattering orders are compared to the simulations with direct backscattering only. A general effect of multiple scattering is a spreading of the echoes toward longer round-trip travel distances. At $\lambda = 1064$ nm, the vegetation reflectance and transmittance are higher, which causes a larger contribution of multiple scatterings in the canopy. In the case of the corn field, the vegetation is located at ground level, and multiple scattering has an impact on the ground echo. In the case of the tropical forest, the ground echo comes essentially from direct returns through gaps in the canopy.

III. Aggregation of the Small-Footprint Signals

The linear aggregation method that we evaluate in this section consists of a weighted average of the lidar signals s_i located inside the large footprint to be simulated. The aggregated signal $\tilde{S}(R)$ can be expressed as

$$\tilde{S}(R) = \sum_i c_i s_i(R). \tag{2}$$

The weights c_i are proportional to the distribution of the laser intensity inside the large illumination footprint. We assume a Gaussian distribution.

Fig. 5 shows the resulting aggregated signals for each scanner configuration at both wavelengths. The first conclusion is that all three scanner configurations provide correlation coefficients $r^2 \geq 0.97$ in every situation. The differences between the aggregated signals and the satellite simulated signals are observed on the peak amplitudes and on the trailing edges of the signal. Table IV gives the error e, computed as the relative root-mean-square error between the simulated signal $S(R)$ and the aggregated signal $\tilde{S}(R)$

$$e = \sqrt{\frac{\sum \left(S(R) - \tilde{S}(R)\right)^2}{\sum S(R)^2}}. \tag{3}$$

We clearly see here that the aggregation method gives better results for a wavelength of $\lambda = 1557$ nm. The largest error for $\lambda = 1064$ nm is mainly due to the larger part of multiple scattering in the large-footprint signal.

One can note that the error caused by aggregating the small-footprint signals (Fig. 5) is similar to that made by neglecting multiple scattering (Fig. 4), suggesting that multiple scattering alone is responsible for a large part of the error e of this aggregation method.

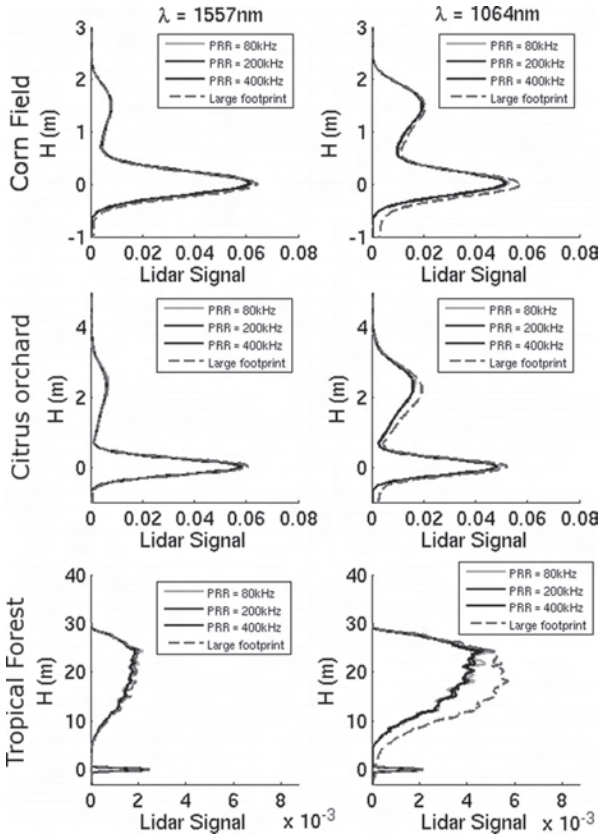


Fig. 5. Aggregation results compared with the large footprint simulated signals. The aggregation results in the three laser scanner configurations are compared to the satellite simulated signal for laser wavelengths $\lambda = 1557$ nm (left) and $\lambda = 1064$ nm (right).

TABLE IV
Error e of the Aggregation Method for Each Scene, Each Scanner Configuration and Each Wavelength

	PRR (kHz)	80	200	400
Corn	$\lambda = 1064nm$	15.5%	16.6%	17.3%
field	$\lambda = 1557nm$	8.6%	9.0%	9.7%
Citrus	$\lambda = 1064nm$	15.1%	15.6%	16.5%
orchard	$\lambda = 1557nm$	6.0%	5.0 %	5.5%
Tropical	$\lambda = 1064nm$	30.3%	31.0%	30.5%
forest	$\lambda = 1557nm$	10.3%	9.4%	2.2%

This article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal. Content is final as presented, with the exception of pagination.

IV. Conclusion

We have presented an aggregation method for simulating large-footprint satellite-based full-waveform lidar signals from commercial airborne laser scanner measurements. Thanks to the DELiS model, we were able to test the aggregation method by simulating the observation of the same vegetated area by a satellite sensor and by an airborne laser scanner.

The simulated scenes were chosen to represent various types of vegetation, different heights (low vegetation, small trees, high vegetation) and different vegetation densities (corn field, citrus orchard, tropical forest). Based on these scenes, we showed that the aggregation of the small-footprint data sets can be a good way for estimating satellite waveforms and thus for designing future space-based sensors ($r^2 > 0.97$ in all situations).

We tested three different typical airborne scanner configurations (low, medium, and high altitude), thus inducing different footprint sizes and different point densities on the ground. The simulations do not show a dependance of the performance of the aggregation method to the scanning configuration. However, they show a strong dependance to the lidar wavelength, that can be attributed to multiple scattering. All the simulations were performed with two standard laser wavelengths ($\lambda = 1064$ nm and $\lambda = 1557$ nm). $\lambda = 1064$ nm showed more distinct errors on the amplitude of the vegetation echoes (up to 30%), due to more multiple scattering in the large-footprint signal for this wavelength. The use of $\lambda = 1557$ nm reduces this error to 10% in the worst situation.

To complete that study, we are currently working on the experimental validation of the DELiS model. The problem of the atmospheric propagation of the backscattered signal also has to be adressed, especially for the spaceborne instrument. Further improvements could include the use of more accurate optical properties for the different types of vegetation, and a more precise study of the impact of vegetation structure on multiple scattering.

Acknowledgment

The authors would like to thank J.-P. Gastellu-Etchegorry, N. Lauret, and E. Grau (CESBIO) for helping to model the corn field and the citrus orchard. The authors also thank N. Barbier (AMAP) for providing the AlloStand-generated tropical forest and for his advice about this canopy model. The authors would also like to thank Magellium as well as DGA and P. Adam (DGA/MRIS/Photonics) for funding and supporting our work.

References

[1] J. Holmgren, M. Nilsson, and H. Olsson, "Estimation of tree height and stem volume on plots using airborne laser scanning," *Forest Sci.*, vol. 49, no. 3, pp. 419–428, Jun. 2003.

[2] J. Hyyppa, H. Hyyppa, D. Leckie, F. Gougeon, X. Yu, and M. Maltamo, "Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 29, no. 5, pp. 1339–1366, Mar. 2008.

[3] R. Nelson, "Model effects on GLAS-based regional estimates of forest biomass and carbon," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 31, no. 5, pp. 1359–1372, Feb. 2010.

[4] J. Boudreau, R. F. Nelson, H. A. Margolis, A. Beaudoin, L. Guindon, and D. S. Kimes, "Regional above-ground forest biomass using airborne and spaceborne LiDAR in Quebec," *Remote Sens. Environ.*, vol. 112, no. 10, pp. 3876–3890, Oct. 2008.

[5] Y. Hirata, M. H. Phua, H. Saito, T. Matsuura, W. Wong, A. Korom, and K. Kitayama, "Characteristics of satellite LiDAR waveform in tropical rain forests from the comparison with canopy condition derived from high resolution satellite data," in *Proc. 11th SilviLaser Int. Conf. LiDar Appl. Assessing Forest Ecosyst.*, 2011, pp. 1–6.

[6] NASA—Vegetation Canopy Lidar (VCL). [Online]. Available: http://www.nasa.gov/offices/oce/appel/knowledge/publications/VCL.html

[7] DESDynI: Home. [Online]. Available: http://www.jpl.nasa.gov/missions/details.php?id=5871

[8] Land, Vegetation, and Ice Sensor (LVIS). [Online]. Available: http://lvis.gsfc.nasa.gov/index.html

[9] H. Tang, R. Dubayah, A. Swatantran, M. Hofton, S. Sheldon, D. B. Clark, and B. Blair, "Retrieval of vertical LAI profiles over tropical rain forests using waveform lidar at La Selva, Costa Rica," *Remote Sens. Environ.*, vol. 124, pp. 242–250, Sep. 2012.

[10] S. J. Hook, J. J. Myers, K. J. Thome, M. Fitzgerald, and A. B. Kahle, "The MODIS/ASTER airborne simulator (MASTER)A new instrument for earth science studies," *Remote Sens. Environ.*, vol. 76, no. 1, pp. 93–102, Apr. 2001.

[11] C. Mallet and F. Bretar, "Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art," *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 64, no. 1, pp. 1–16, Jan. 2009.

[12] C. Mallet, F. Bretar, and U. Soergel, "Analysis of full-waveform lidar data for classification of urban areas," *Photogramm. Fernerkundung Geoinf.*, vol. 5, pp. 337–349, May 2008.

[13] T. Ristorcelli, D. Hamoir, X. Briottet, G. Cazanave, D. Petit, and J.-P. Gastellu-Etchegorry, "Modelling of full-waveform, 3D laser imaging for vegetation characterisation and foliage penetration," presented at the Proc. OPTRO, Paris, France, Feb. 2012, OPTRO-2012-102.

[14] J. Gastellu-Etchegorry, E. Grau, and N. Lauret, "Dart: A 3D model for remote sensing images and radiative budget of earth surfaces," in *Modeling and Simulation in Engineering*. Manhattan, NY, USA: InTechOpen, 2012.

[15] N. Lauret and J.-P. Gastellu-Etchegorry, private communication, 2012.

[16] RAMI, RAdiation transfer Model Intercomparison—European Commission 2012. [Online]. Available: http://rami-benchmark.jrc.ec.europa.eu/HTML/

[17] N. Barbier, P. Couteron, J. Gastelly-Etchegorry, and C. Proisy, "Linking canopy images to forest structural parameters: Potential of a modeling framework," *Ann. Forest Sci.*, vol. 69, no. 2, pp. 305–311, Mar. 2011.

[18] H. C. Müller-Landau, R. S. Condit, K. E. Harms, C. O. Marks, S. C. Thomas, S. Bunyavejchewin, G. Chuyong, L. Co, S. Davies, R. Foster, S. Gunatilleke, N. Gunatilleke, T. Hart, S. P. Hubbell, A. Itoh, A. R. Kassim, D. Kenfack, J. V. LaFrankie, D. Lagunzad, H. S. Lee, E. Losos, J. R. Makana, T. Ohkubo, C. Samper, R. Sukumar, I. F. Sun, M. N. Nur Supardi, S. Tan, D. Thomas, J. Thompson, R. Valencia, M. I. Vallejo, G. V. Muñoz, T. Yamakura, J. K. Zimmerman, H. S. Dattaraja, S. Esufali, P. Hall, F. He, C. Hernandez, S. Kiratiprayoon, H. S. Suresh, C. Wills, and P. Ashton, "Comparing tropical forest tree size distributions with the predictions of metabolic ecology and equilibrium models," *Ecol. Lett.*, vol. 9, no. 5, pp. 589–602, May 2006.

[19] P. W. Richards, R. P. D. Walsh, I. C. Baillie, and P. Greig-Smith, *The Tropical Rain Forest: An Ecological Study*, 2nd ed. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, Aug. 1996.

[20] S. Jacquemoud and F. Baret, "PROSPECT:A model of leaf optical properties spectra," *Remote Sens. Environ.*, vol. 34, no. 2, pp. 75–91, Nov. 1990.

[21] MEMOIRES, Thermo-Optical Data Base—ONERA/DOTA-EN. [Online]. Available: http://hathor.onera.fr/dota-en/memoires/index.php

[22] RIEGL—RIEGL Laser Measurement Systems. [Online]. Available: http://www.riegl.com

[23] Y. Pang, M. Lefsky, G. Sun, and J. Ranson, "Impact of footprint diameter and off-nadir pointing on the precision of canopy height estimates from spaceborne lidar," *Remote Sens. Environ.*, vol. 115, no. 11, pp. 2798–2809, Nov. 2011.

[24] P. R. J. North, J. A. B. Rosette, J. C. Suárez, and S. O. Los, "A Monte Carlo radiative transfer model of satellite waveform LiDAR," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 31, no. 5, pp. 1343–1358, Feb. 2010.

Bibliographie

E. Ahokas, H. Kaartinen, X. Yu, J. Hyyppä et H. Hyyppä : Analyzing the effects related to the accuracy of laser scanning for digital elevation and target models. *In Proceedings of the 22nd symposium of the European Association of Remote Sensing Laboratories : In Geoinformation for European wide Integration*, p. 46, 2002.

H.-E. Andersen, R. J. McGaughey et S. E. Reutebuch : Estimating forest canopy fuel parameters using LIDAR data. *Remote sensing of Environment*, 94(4):441–449, 2005.

P. Beckmann et A. Spizzichino : The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces. *Norwood, MA, Artech House, Inc., 1987, 511 p.*, 1, 1987.

A. Berk, L. S. Bernstein et D. C. Robertson : MODTRAN : a moderate resolution model for LOWTRAN. Rap. tech., DTIC Document, 1987.

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 and Remote Sensing*, 54(2):115–122, 1999.

L. Bousquet : *Mesure et modélisation des propriétés optiques spectrales et directionnelles des feuilles.* Thèse de doctorat, 2007.

A. C. Brenner, H. J. Zwally, C. R. Bentley, D. J. Harding, M. A. Hofton, J. B. Minster, L. Roberts, J. Saba et R. Thomas : Derivation of range and range distributions from laser pulse waveform analysis for surface elevations, roughness, slope, and vegetation heights. *NASA Goddard Space Flight Cent., Greenbelt, Md*, p. 33–36, 2003.

R. R. Burton, J. R. Schott et S. D. Brown : Elastic LADAR modeling for synthetic imaging applications. *In Proc. of SPIE Vol*, vol. 4816, p. 145, 2002.

A. Charaniya, R. Manduchi et S. Lodha : Supervised parametric classification of aerial LiDAR data. *In Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop, 2004. CVPRW '04*, p. 30–30, 2004.

A. Chauve, C. Mallet, F. Bretar, S. Durrieu, M. P. Deseilligny et W. Puech : Processing full-waveform lidar data : modelling raw signals. *In International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 2007*, p. 102–107, 2007.

J. Cohen : A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20(1):37–46, avr. 1960. ISSN 0013-1644.

R. L. Cook et K. E. Torrance : A reflectance model for computer graphics. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 1(1):724, 1982.

F. Coubard, M. Brédif, N. Paparoditis et X. Briottet : Reflectance estimation from urban terrestrial images : Validation of a symbolic ray-tracing method on synthetic data. *In Photogrammetric Image Analysis*, 2011.

C. T. De Wit : Photosynthesis of leaf canopies. Agricultural Research Report 663PUDOC, 1965.

M. Doneus et C. Briese : Full-waveform airborne laser scanning as a tool for archaeological reconnaissance. *BAR International Series*, 1568:99, 2006.

M. Doneus, C. Briese, M. Fera et M. Janner : Archaeological prospection of forested areas using full-waveform airborne laser scanning. *Journal of Archaeological Science*, 35 (4):882–893, 2008.

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. Prince : Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar. *Remote Sensing of Environment*, 79(2):305–319, 2002.

R. O. Dubayah et J. B. Drake : Lidar remote sensing for forestry. *Journal of Forestry*, 98 (6):44–46, 2000.

L. I. Duncanson, K. O. Niemann et M. A. Wulder : Estimating forest canopy height and terrain relief from GLAS waveform metrics. *Remote Sensing of Environment*, 114 (1):138–154, 2010.

A. Einstein : Zur Quantentheorie der Strahlung. *Physikalische Zeitschrift*, 18:121–128, 1917.

J. P. Gastellu-Etchegorry, V. Demarez, V. Pinel et F. Zagolski : Modeling radiative transfer in heterogeneous 3-D vegetation canopies. *Remote Sensing of Environment*, 58 (2):131–156, nov. 1996.

G. Guenther, A. Cunningham, P. Rocque et D. Reid : Meeting the accuracy challenge in airborne lidar bathymetry. *In 20th Workshop on lidar remote sensing on land and sea EARSel*, "Dept. of Laser Syst., Swedish Defence Res. Agency, Linkoping, Sweden", 2000.

B. Höfle, M. Hollaus et J. Hagenauer : Urban vegetation detection using radiometrically calibrated small-footprint full-waveform airborne LiDAR data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 67:134–147, jan. 2012. ISSN 0924-2716.

M. A. Hofton, J. B. Minster et J. B. Blair : Decomposition of laser altimeter waveforms. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 38(4):1989–1996, 2000.

C. Hug, A. Ullrich et A. Grimm : Litemapper-5600-a waveform-digitizing LiDAR terrain and vegetation mapping system. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(Part 8):W2, 2004.

P. Hyde, R. Dubayah, B. Peterson, J. B. Blair, M. Hofton, C. Hunsaker, R. Knox et W. Walker : Mapping forest structure for wildlife habitat analysis using waveform lidar : Validation of montane ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 96(3):427–437, 2005.

J. Hyyppä, U. Pyysalo, H. Hyyppä et A. Samberg : Elevation accuracy of laser scanning-derived digital terrain and target models in forest environment. *In 4th Workshop on lidar remote sensing of land and sea. Dresden, Germany : EARSeL*, 2000.

J. Hyyppä, H. Hyyppä, P. Litkey, X. Yu, H. Haggrén, P. Rönnholm, U. Pyysalo, J. Pitkänen et M. Maltamo : Algorithms and methods of airborne laser-scanning for forest measurements. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(8/W2):82–89, 2004.

J. Hyyppä, M. Schardt, H. Haggrén, B. Koch, U. Lohr, R. Paananen, H. U. Scherrer, H. Luukkonen, M. Ziegler, H. Hyyppä, U. Pyysalo, H. Friedländer, J. Uuttera, S. Wagner, M. Inkinen, A. Wimmer, A. Kukko, E. Ahokas et M. Karjalainen : HIGH-SCAN : The first European-wide attempt to derive single-tree information from laserscanner data. *The Photogrammetric Journal of Finland*, 17(2):58–68, 2001.

K. Iizuka : *Engineering Optics*. Springer, fév. 2008. ISBN 9780387757230.

S. Jacquemoud et F. Baret : PROSPECT : a model of leaf optical properties spectra. *Remote sensing of environment*, 34(2):75–91, 1990.

R. Jelalian : *Laser radar systems*. Artech House, Boston, London, 1992.

B. Jutzi et U. Stilla : Characteristics of the measurement unit of a full-waveform laser system. *Revue Fran\ccaise de Photogrammétrie et de Télédétection*, 182(2006-2):17–22, 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, 2006.

W. Koechner : *Solid-State Laser Engineering*. Springer, 2006. ISBN 9780387290942.

K. Kraus et N. Pfeifer : Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and remote Sensing*, 53(4):193–203, 1998.

J. R. Landis et G. G. Koch : A one-way components of variance model for categorical data. *Biometrics*, p. 671679, 1977.

M. A. Lefsky, W. B. Cohen, S. A. Acker, G. G. Parker, T. A. Spies et D. Harding : Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of douglas-fir western hemlock forests. *Remote Sensing of Environment*, 70(3):339–361, 1999a.

M. A. Lefsky, W. B. Cohen, G. G. Parker et D. J. Harding : Lidar remote sensing for ecosystem studies : Lidar, an emerging remote sensing technology that directly measures the three-dimensional distribution of plant canopies, can accurately estimate vegetation structural attributes and should be of particular interest to forest, landscape, and global ecologists. *BioScience*, 52(1):19–30, 2002.

M. A. Lefsky, D. Harding, W. B. Cohen, 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*, 67(1):83–98, 1999b.

T. H. Maiman : Stimulated optical radiation in ruby. *Nature*, 187(4736):493–494, août 1960.

C. Mallet et F. Bretar : Full-waveform topographic lidar : State-of-the-art. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(1):1 – 16, 2009. ISSN 0924-2716.

C. Mallet : *Analyse des données lidar aéroportées à Retour d'Onde Complète pour la cartographie des milieux urbains.* Thèse de doctorat, Télécom ParisTech, nov. 2010.

C. Mallet, F. Bretar, M. Roux, U. Soergel et C. Heipke : Relevance assessment of full-waveform lidar data for urban area classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(6, Supplement):S71–S84, déc. 2011. ISSN 0924-2716.

C. Mallet, F. Lafarge, M. Roux, U. Soergel, F. Bretar et C. Heipke : A marked point process for modeling lidar waveforms. *Image Processing, IEEE Transactions on*, 19 (12):3204–3221, 2010.

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.

Meshalb : Meshlab. URL `http://meshlab.sourceforge.net/`.

K. Millard, C. Burke, D. Stiff et A. Redden : Detection of a low-relief 18th-century british siege trench using LiDAR vegetation penetration capabilities at Fort Beauséjour-Fort Cumberland national historic site, canada. *Geoarchaeology*, 24(5):576–588, 2009. ISSN 1520-6548.

M. E. Miller, M. Lefsky et Y. Pang : Optimization of geoscience laser altimeter system waveform metrics to support vegetation measurements. *Remote Sensing of Environment*, 115(2):298–305, 2011.

F. Morsdorf, O. Frey, B. Koetz et E. Meier : Ray tracing for modeling of small footprint airborne laser scanning returns. *In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing Volume XXXVI, Part 3 / W52*, p. 294–299, 2007.

A. L. Neuenschwander, L. A. Magruder et M. Tyler : Landcover classification of small-footprint, full-waveform lidar data. *Journal of Applied Remote Sensing*, 3(1):033544–033544, 2009.

W. Ni-Meister, D. L. Jupp et R. Dubayah : Modeling lidar waveforms in heterogeneous and discrete canopies. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 39(9):1943–1958, 2001.

F. Nicodemus, J. Richmond, J. Hsia, I. Ginsberg et T. Limperis : Geometrical considerations and nomenclature for reflectance. p. 52, 1977.

P. R. J. North, J. A. B. Rosette, J. C. Suárez et S. O. Los : A monte carlo radiative transfer model of satellite waveform LiDAR. *International Journal of Remote Sensing*, 31 (5):1343–1358, 2010. ISSN 0143-1161.

R. Perez, R. Seals et J. Michalsky : All-weather model for sky luminance distribution-Preliminary configuration and validation. *Solar Energy*, 50(3):235–245, mars 1993. ISSN 0038-092X.

PerkinElmer : Perkinelmer website. URL `http://www.perkinelmer.com/default.xhtml`.

A. Persson, U. Söderman, J. Töpel et S. Ahlberg : Visualization and analysis of full-waveform airborne laser scanner data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(3/W19):103–108, 2005.

A. Persson, J. Holmgren et U. Söderman : Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68 (9):925–932, 2002.

M. Pharr et G. Humphrey : *Physically Based Rendering, From Theory to Implementation.* Morgan Kaufmann Publishers, 2004.

Y. Qin, T. T. Vu et Y. Ban : Toward an optimal algorithm for LiDAR waveform decomposition. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 9(3):482–486, 2012.

RAMI : RAMI, RAdiation transfer model intercomparison - european commission. URL `http://rami-benchmark.jrc.ec.europa.eu/HTML/`.

J. Reitberger, P. Krzystek et U. Stilla : Combined tree segmentation and stem detection using full waveform lidar data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36:332–337, 2007.

J. Reitberger, P. Krzystek et U. Stilla : Analysis of full waveform LIDAR data for the classification of deciduous and coniferous trees. *International journal of remote sensing*, 29(5):1407–1431, 2008.

J. Reitberger, C. Schnörr, P. Krzystek et U. Stilla : 3D segmentation of single trees exploiting full waveform LIDAR data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(6):561–574, 2009.

J. Reitberger : *3D-Segmentierung von Einzelbäumen und Baumartenklassifikation aus Daten flugzeuggetragener Full Waveform Laserscanner.* Thèse de doctorat, PhD thesis, Technische Universität München, Institut für Photogrammetrie und Kartographie Fachgebiet Photogrammetrie und Fernerkundung, 2010.

S. E. Reutebuch, H.-E. Andersen et R. J. McGaughey : Light detection and ranging (LIDAR) : an emerging tool for multiple resource inventory. *Journal of Forestry*, 103 (6):286–292, 2005.

S. E. Reutebuch, R. J. McGaughey, H.-E. Andersen et W. W. Carson : Accuracy of a high-resolution lidar terrain model under a conifer forest canopy. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(5):527–535, 2003.

R. D. Richmond et S. C. Cain : *Direct-Detection LADAR Systems (SPIE Tutorial Text Vol. TT85).* SPIE Publications, Pap/Cdr édn, mars 2010. ISBN 081948072X.

Riegl : RIEGL - RIEGL laser measurement systems. URL `http://www.riegl.com/`.

T. Ristorcelli, D. Hamoir et X. Briottet : Simulating space lidar waveforms from smaller-footprint airborne laser scanner data for vegetation observation. Early Access Online, 2013. ISSN 1545-598X.

T. Ristorcelli, D. Hamoir, X. Briottet, G. Cazanave, D. Petit et J.-P. Gastellu-Etchegorry : Modelling of full-waveform, 3D laser imaging for vegetation characterisation and foliage penetration. OPTRO 2012, Paris, fév. 2012.

F. Rocadenbosch Burillo : Lidar sensing of the atmosphere : receiver design and inversion algorithms for an elastic system, déc. 1996.

A. Roncat, W. Wagner, T. Melzer et A. Ullrich : Echo detection and localization in full-waveform airborne laser scanner data using the averaged square difference function estimator. *The Photogrammetric Journal of Finland*, 21(1):62–75, 2008.

J. A. B. Rosette, P. R. J. North et J. C. Suarez : Vegetation height estimates for a mixed temperate forest using satellite laser altimetry. *International Journal of Remote Sensing*, 29(5):1475–1493, 2008.

M. Rutzinger, B. Höfle, M. Hollaus et N. Pfeifer : Object-based point cloud analysis of full-waveform airborne laser scanning data for urban vegetation classification. *Sensors*, 8(8):4505–4528, août 2008. ISSN 1424-8220.

C. Schlick : An inexpensive BRDF model for physically-based rendering. *In Computer graphics forum*, vol. 13, p. 233–246, 2003.

J. Secord et A. Zakhor : Tree detection in urban regions using aerial lidar and image data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 4(2):196–200, 2007. ISSN 1545-598X.

M. Simard, N. Pinto, J. B. Fisher et A. Baccini : Mapping forest canopy height globally with spaceborne lidar. *Journal of Geophysical Research : Biogeosciences (2005-2012)*, 116 (G4), 2011.

SLICER : site internet de SLICER et SLA : http ://denali.gsfc.nasa.gov/lapf/.

F. J. Studnicka et C. Doppler : *Ueber das farbige Licht der Doppelsterne und einiger anderer Gestirne des Himmels. Versuch einer das Bradley'sche Aberrationstheorem als integrirenden Theil in sich schliessenden allgemeineren Theorie. Zur Feier seines hundertsten Geburtstages als erste Veröffentlichung des nach ihm benannten physikalischen Princips. Neu hrsg. von F.J. Studnicka.* K. Böhm, Prag, 1903.

G. Sun et K. J. Ranson : Modeling lidar returns from forest canopies. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 38(6):2617–2626, 2000.

O. Svelto : *Principles of Lasers.* Springer, 2010. ISBN 9781441913029.

A. Ullrich et M. Pfennigbauer : Echo digitization and waveform analysis in airborne and terrestrial laser scanning. *In Photogrammetric week '11*, "Institut für Photogrammetrie, Stuttgart, Germany", 2011.

W. Wagner, M. Hollaus, C. Briese et V. Ducic : 3D vegetation mapping using small-footprint fullwaveform airborne laser scanners. *International Journal of Remote Sensing*, 29(5):1433–1452, 2008. ISSN 0143-1161.

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 and Remote Sensing*, 60(2):100–112, 2006.

C.-K. Wang : Exploring weak and overlapped returns of a lidar waveform with a wavelet-based echo detector. 2012.

A. Wehr et U. Lohr : Airborne laser scanning, an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2):68–82, 1999.

T. Yin, J.-P. Gastellu-Etchegorry, E. Grau, N. Lauret et J. Rubio : Simulating satellite waveform lidar with DART model. *In IGARSS*, 2013.

X. Yu, J. Hyyppä, 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.

K. Zhang, S.-C. Chen, D. Whitman, M.-L. Shyu, J. Yan et C. Zhang : A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LIDAR data. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 41(4):872–882, 2003.

Evaluation de l'apport des visées multi-angulaires en imagerie laser pour la reconstruction 3D des couverts végétaux

Le scanner laser aéroporté est une technique d'imagerie très prometteuse, notamment pour l'observation des zones forestières. En particulier, la déclinaison "onde complète", qui consiste à enregistrer l'intégralité du signal lumineux réfléchi par la scène suite à l'émission d'une impulsion laser, permet de sonder les couverts végétaux en profondeur. De nombreux systèmes commerciaux sont disponibles et d'ores et déjà utilisés en particulier en topographie ou en bathymétrie. Mais ces systèmes ne sont pas dédiés à l'observation de la végétation. L'objectif de cette thèse est l'étude de l'intérêt de ces systèmes pour la reconstruction géométrique des modèles numériques de terrain sous couvert végétal, et le développement d'outils qui permettront d'optimiser les performances des systèmes lidar onde complète dans ce but.

Dans un premier temps, nous avons développé un modèle physique de lidar onde complète adapté à la simulation de l'observation de scènes de végétation. Le modèle DELiS (n-Dimensional Estimation of Lidar Signals) permet de simuler l'observation de scènes de végétation complexes et réalistes, tout en incluant la prise en compte de l'environnement extérieur (atmosphère, soleil) ainsi que des bruits de mesure.

Une fois le modèle DELiS validé par confrontation à des résultats analytiques, nous avons utilisé ses capacités de simulation afin d'étudier l'intérêt du lidar onde complète pour la reconstruction d'un modèle numérique de terrain sous couvert végétal. Dans ce but, nous avons mis en place une méthode originale de traitement et de classification des données lidar onde complète permettant de séparer les échos lidar provenant du sol de ceux provenant de la végétation. Grâce à ces données classifiées, nous pouvons ensuite reconstruire la géométrie du sol et des objets initialement occultés par la végétation.

Enfin, nous nous intéresserons à la possibilité de combiner des données aéroportées acquises sous différents points de vue afin d'améliorer les reconstructions.

Mis à part le développement d'un outil opérationnel de simulation de la mesure lidar onde complète, qui pourra servir de support à de nombreuses études ainsi qu'au développement et au dimensionnement de nouveaux instruments, nous avons pu démontrer dans cette thèse que le scanner laser aéroporté onde complète pouvait permettre d'obtenir en milieux forestier des reconstructions de la géométrie du terrain à des résolutions sub-métriques et avec une précision de l'ordre de 10 à 20 centimètres.

La combinaison des visées multi-angulaire permet, par l'apport d'une quantité importante d'information supplémentaire, d'améliorer encore les reconstructions. Nous montrons cependant que les visées inclinées sont plus sensibles à la présence des troncs et branchages des arbres, éléments qui sont susceptibles d'introduire une erreur importante dans les processus de classification et de reconstruction. Pour cette raison, nous recommandons l'utilisation de la visée nadir pour la reconstruction mono-vue des modèles numériques de terrain, et nous proposons une méthode permettant de choisir de façon optimale les visées inclinées à ajouter pour l'observation détaillée d'une portion plus restreinte de la scène.

Mots-clés :

TELEDETECTION ; IMAGERIE LASER ; IMAGERIE ACTIVE ; IMAGERIE 3D ; LIDAR ; ONDE COMPLETE ; COUVERT VEGETAL ; PENETRATION SOUS FEUILLAGE ; MODELISATION ; RECONSTRUCTION ; MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN ; VEGETATION

Evaluating the benefits of multi-angular approaches in laser imaging applied to the 3D-reconstruction of vegetation covers

This research work regards the scientific challenge of reconstructing the ground and the object presents under a vegetation cover from airborne observations.

Airborne laser scanning is a promising technology. Full-waveform devices are able to record the complete temporal return signal following the emission of a short laser pulse towards the ground. This offers a great potential for remote sensing of forested areas, since the laser pulse will travel through the vegetation. Many commercial systems are already operated for topography or bathymetry.

Scientists have been using these systems for vegetation observation, even if they are not dedicated to this purpose. The objective of this thesis is to study the relevance of full-waveform lidars for the geometric reconstruction of digital terrain models (DTM) under vegetation. We also aim at developing simulation and data processing tools that will help design and optimize future sensors dedicated to vegetation observation.

Our first task was the development of a new physical simulator for full-waveform lidar measurement. The DELiS model (n-Dimensional Estimation of Lidar Signals) is able to simulate the observation of complex and realistic vegetation scenes while accounting for atmosphere and sun perturbations, and simulating the multiple scattering of the laser pulse in the canopy. We have also implemented a sensor model for simulation of the measurement, amplification and digitization noises. This operational simulation tool is a key asset for future physical studies as well as for designing and optimizing future sensors and data processing methods.

After validating the DELiS model by confrontation with analytical results, we have used it for studying the interest of full- waveform lidar for digital terrain models reconstruction under vegetation. For this purpose, we have developed a full-waveform lidar data processing method for decomposition of the signals and classification of the lidar echoes into two classes : 'ground' and 'vegetation'. We were then able to reconstruct ground geometry.

Finally, we have led a study on the combination of multi-angular acquisitions for improvement of the reconstructions.

Our work shows that airborne full-waveform lidar observations may allow ground reconstruction with sub-metric resolutions and a precision of 10 to 20 centimeters in forested areas.

Combining multiple viewing angles provides additional data, and helps improving the precision of the reconstructions. Yet, we show that non-nadir viewing is much more sensitive to trunks and branches. These elements may be the cause of an additional error in the classification and reconstruction processes. For this reason, we recommend using nadir viewing for single-view ground reconstruction, and propose a method for optimally selecting non-nadir views for the detailed observation of restricted areas of interest.

Keywords :

TELEDETECTION ; LASER IMAGING ; ACTIVE IMAGING; 3D IMAGING; LIDAR ; FULL WAVEFORM ; VEGETATION COVER ; FOLIAGE PENETRATION ; MODELING ; RECONSTRUCTION ; TERRAIN NUMERICAL MODEL ; VEGETATION

Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales
2 avenue Edouard Belin - BP 74025
31055 TOULOUSE Cedex 4
Tél. : +33 5 62 25 25 25
http://www.onera.fr