



HAL
open science

Etude de sensibilité du signal Lidar - Validation de la modélisation

Eloi Grau

► **To cite this version:**

Eloi Grau. Etude de sensibilité du signal Lidar - Validation de la modélisation. [Rapport de recherche] irstea. 2016, pp.92. hal-02605531

HAL Id: hal-02605531

<https://hal.inrae.fr/hal-02605531v1>

Submitted on 16 May 2020

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

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

Etude de sensibilité du signal Lidar - validation de la modélisation

Eloi Grau

CNES / IRSTEA - eloi.grau@gmail.com - UMR TETIS

7 octobre 2015

I	Notations et acronymes	4
II	Introduction	4
III	Méthodologie	5
1	Création des maquettes "théoriques"	7
2	Création des maquettes "réelles"	7
2.1	Maquettes "AMAP"	7
2.2	Maquettes "TLS"	8
2.3	Maquettes "Terrain"	9
2.4	Maquettes "Hybride"	9
2.5	La problématique du LAI	10
3	Simulation des acquisitions Lidar	12
3.1	Simulation des acquisitions Lidar ALS	12
3.2	Simulation des acquisitions Lidar Spatial	12
3.3	Paramétrage des simulations	12
4	Analyse et validation des simulations	12
4.1	Agrégation ALS pour simuler du Lidar spatial	12
4.2	Comparaison des WF - Métriques Lidar et coefficient de corrélation	13
	Coefficient de corrélation	13
	Métriques Lidar	13
	Problèmes des indicateurs	14
IV	Maquettes "théoriques"	15
1	LAI, taux de couverture, clumping : étude de sensibilité aux paramètres d'un peuplement théorique homogène	15
1.1	Clumping	15
1.2	Taux de couverture	18
1.3	Conclusion	18
2	Influence de la macro-structure forestière : peuplement théorique mono- et bi-strate	20
2.1	Végétation mono-strate	20
2.2	Végétation bi-strate	23
V	Site des Landes (forêt tempérée de résineux)	24
1	Données	24
2	Simulation des Maquettes initiales	25
3	Simulation des WF	29
3.1	Comparaison des WF ALS cumulées : mesurées vs simulées	29
3.2	Comparaison des WF large empreinte : ALS simulées cumulées vs Spatial simulées	30
4	Etude de sensibilité à la représentation de la végétation	31
4.1	Sensibilité au LAI	31

4.2	Sensibilité à la réflectance du sol	32
4.3	Sensibilité à la réflectance de la végétation	33
4.4	Sensibilité à la pente	34
4.5	Maquettes "Hybrides" : Sensibilité à la présence de végétation sur le sol	35
4.6	Maquettes "sucettes" : Sensibilité à la distribution du LAI	36
	Sensibilité à la taille des houppiers	36
	Sensibilité au profil de LAI dans le houppier	36
4.7	Maquettes "TLS" : Sensibilité à la distribution du LAI	38
4.8	Maquettes "AMAP" : Voxélisation des houppiers	38
5	Etude de sensibilité aux paramètres capteur	40
5.1	Angle d'incidence	40
5.2	Sensibilité au rayon du footprint	41
5.3	Sensibilité à la précision sur la position	42
6	Tableau récapitulatif et conclusion	43
VI Site de La Réunion (forêts tropicales)		44
1	Données	44
1.1	Mesures terrains	44
1.2	Vols Lidar	47
2	Simulation des Maquettes initiales	48
3	Simulation des WF	50
4	Analyse de sensibilité	50
VII Dimensionnement du capteur		52
1	Énergie théorique	52
2	Impact de l'atmosphère	54
3	Bruit solaire	55
4	Conclusion	55
VIII Conclusion générale		56
A Rapport du vol ALS Landes		57
B Rapport de calibration avec le spectralon sur la campagne Paracou		59
C Inversion du LAI		66
D Landes : Etude de sensibilité à la représentation de la végétation		67
1	Sensibilité au LAI	67
2	Sensibilité à la réflectance du sol	68
3	Sensibilité à la réflectance de la végétation	69
4	Sensibilité à la pente	70
5	Maquettes "TLS" : Sensibilité à la distribution du LAI	71
6	Maquettes "sucettes" : Sensibilité à la distribution du LAI	73
6.1	Sensibilité à la taille des houppiers	73
6.2	Sensibilité au profil de LAI dans le houppier	73
6.3	Sensibilité à la présence de végétation sur le sol	75
7	Maquettes "AMAP" : Voxélisation des houppiers	76
8	Sensibilité aux paramètres capteur	77
8.1	Angle d'incidence	77
8.2	Rayon du footprint	78
8.3	Précision sur la position	79

E	La Réunion	80
1	Waveforms de référence	80
2	Etude de sensibilité à la représentation de la végétation	81
2.1	Sensibilité au LAI	81
2.2	Sensibilité à la réflectance de la végétation	82
2.3	Sensibilité à la réflectance du sol	83
2.4	Maquettes "Terrain" : Sensibilité à la présence d'une couche herbacée	84
2.5	Maquettes "Terrain" : Sensibilité à la pente	85
2.6	Maquettes "TLS" : sensibilité à la distribution du LAI	86
3	Etude de sensibilité aux paramètres capteur	87
3.1	Sensibilité au rayon du footprint	88
3.2	Sensibilité à la direction de visée	89
3.3	Sensibilité à la précision sur la position visée	90

Ce post-doctorat a démarré en septembre 2013 pour une durée d'un an, reconduite un an. Il s'inscrit dans le cadre du projet Stem-Leaf proposé au TOSCA CNES. L'objectif du projet est de développer des outils et des méthodes destinés à évaluer l'impact de certains paramètres d'un système lidar spatial sur la qualité de caractérisation des milieux forestiers. En particulier, il apparaît important de valider des méthodes de simulations qui permettront de dimensionner de nouveaux capteurs et de tester des algorithmes de traitement de données, en particulier l'inversion du signal Lidar en milieu forestier.

I Notations et acronymes

Notation	Signification
ALS	Aerial Laser Scanning
AMAP	botanique et Modélisation de l'Architecture des Plantes
CC	Coefficient de Corrélation
DEM	Digital Elevation Model
dbh	Diamètre at Breast Height
FWHM	Full Width at Half Maximum
LAD	Leaf Angle Distribution
LAI	Leaf Area Index
MNS	Modèle Numérique de Surface
MNT	Modèle Numérique de Terrain
rhXX	Relative Height at XX%
SNR	Signal Noise Ratio
TLS	Terrestrial Laser Scanning
WF	waveform
T_c	taux de couverture
α	taux de trous
G	section efficace d'interception des feuilles
$\bar{\rho}$	densité moyenne des voxels (non vides)
$d\Omega$	angle solide
ρ_s	réflectance du sol
ρ_f	réflectance des feuilles
sr	stéradians
τ_f	transmittance des feuilles
θ	angle zénithal de visée du lidar

II Introduction

Les forêts constituent un élément majeur au cycle du carbone et contribuent de façon significative à la régulation du climat. Elles sont aussi une source d'énergie renouvelable (bois énergie) et, en abritant 65% des taxons terrestres, elles jouent un rôle clé dans le maintien de la biodiversité. Aussi, pouvoir caractériser les forêts et leur dynamique est fondamental. Il est donc indispensable de développer des systèmes robustes de mesure pour estimer et caractériser la dynamique de certains paramètres clés -tels que le volume de bois et la biomasse- afin de pouvoir relever le défi de la gestion durable des ressources forestières et de renforcer leur rôle dans l'atténuation du changement climatique.

Le Lidar est un capteur actif qui enregistre l'énergie en fonction du temps de parcours (*forme d'onde*, ou waveform - WF) d'une impulsion laser émise puis rétro-diffusée par les éléments du paysage. C'est une technologie qui peut potentiellement permettre de mesurer la réflectance et la structure de la forêt à différentes échelles. Dans ce contexte, le lidar spatial apparaît comme une technologie particulièrement prometteuse pour fournir une partie des informations requises et combler le manque en données exhaustives et cohérentes sur l'ensemble des surfaces forestières de la Terre. A ce jour il n'existe aucun système Lidar spatial conçu pour l'étude de la végétation et le CNES soutient des études en vue d'évaluer l'intérêt de développer un tel système.

Cependant, il existe de nombreuses possibilités technologiques pour développer des instruments lidar (*e.g.* énergie d'impulsion, taille de l'empreinte au sol, longueur d'onde), et différentes méthodes d'extraction des paramètres biophysiques (qui elles-même dépendent des choix techniques). Mais la sensibilité des mesures lidar aux paramètres instrumentaux et aux caractéristiques forestières est mal connue. Le couplage entre acquisitions de données Lidar expérimentales et relevés de terrain peut permettre d'étudier cette sensibilité mais cette approche est coûteuse et limitée à l'étude de quelques contextes forestiers. De plus, l'utilisation de données aéroportées pour dimensionner un capteur Lidar spatial comporte intrinsèquement des biais. Ainsi, la simulation doit permettre de étudier la sensibilité du Lidar (aéroporté ou spatial) de façon quasi exhaustive et à moindre frais.

Le modèle DART (Discrete Anisotropic Radiative Transfer) développé au CESBIO, permet de simuler tout type de lidar (terrestre, aéroporté ou spatial) sur des paysages où les éléments peuvent être représentés soit statistiquement par des milieux dits "turbides", soit de façon déterministe à l'aide de triangles (ou une combinaison des deux). Ce modèle est souple et robuste et permet d'effectuer des simulations précises sur un environnement connu, sous réserve que les maquettes (*i.e.* représentation du paysage) soient précises. Un autre modèle a initialement été choisi afin d'intercomparer les résultats, et mieux estimer la précision de chacun des modèles. Il s'agit du modèle Lid'ART développé à l'UMR AMAP et intégré à la plateforme AMAPStudio. Il permet de simuler un capteur Lidar aéroporté ou satellite sur des maquettes d'arbre précises, conçues avec AMAPStudio. Malheureusement pas opérationnel au cours du post-doctorat, il ne sera finalement pas incorporé à cette étude.

Ces modèles simulent le transfert radiatif de façon précise, sur la base des lois physiques du rayonnement. Ils comportent cependant des hypothèses et simplifications permettant de résoudre l'équation du transfert radiatif sur des scènes complexes avec des temps de calcul raisonnables. L'approche par modélisation doit donc être validée sur des cas d'étude pour lesquels on dispose des données terrain (inventaires forestiers) et des mesures Lidar (aéroporté), avant d'étendre les simulations au cas d'un lidar spatial pour lequel il n'existe pas sur les scènes simulées.

Il existe en effet plusieurs types de maquettes (*i.e.* représentations du paysage dans les modèles) *a priori* plus ou moins adaptés à la simulation de tel ou tel type de capteurs de télédétection. Il faut donc identifier le type de maquette adapté à la simulation de mesures lidar spatial. De plus, comme de nombreuses simulations doivent être effectuées, il est important que les maquettes soient optimisées (*i.e.* la plus simple possible sans perte de précision dans des formes d'onde simulées). Ainsi, différentes méthodes de création de simulations DART sont présentées et comparées dans ce document.

Cette étude vise aussi à mieux comprendre l'impact des différents paramètres d'une acquisition Lidar en utilisant la modélisation. Il y a différentes catégories de paramètres : les paramètres du capteur (longueur d'onde, divergence du faisceau, FOV, énergie des impulsions Laser, dimensions du télescope, période d'échantillonnage), les paramètres d'acquisition (direction de visée, altitude de vol, fréquence d'acquisition), les caractéristiques du paysage observé (type de forêt, attributs forestiers - hauteur, dbh, surface terrière, etc. -, LAI, taux de couverture, et propriétés optiques des matériaux - qui sont liées aux paramètres biophysiques comme la teneur en chlorophylle pour les feuilles, ou la présence de nuages pour l'atmosphère). A cela s'ajoutent les paramètres du modèle de transfert radiatif (nombre de photons suivis dans la maquette, résolution spatiale des voxels, discrétisation des directions). La plupart des paramètres a été testé et les plus importants sont présentés dans ce document.

III Méthodologie

La présente étude comporte une partie consacrée à la modélisation de placettes forestières (on appelle "maquette" une placette forestière simulée avec DART), et une partie consacrée à la modélisation et l'étude du signal Lidar. Cette étude se base sur 1) des maquettes "théoriques" définies par un nombre limité de paramètres et 2) des maquettes "réelles" c'est-à-dire calibrées sur des relevés terrain. La première approche permet de mieux comprendre l'interaction entre le signal et le paysage, et la deuxième approche nécessite d'aborder la problématique de représentation d'un couvert réel, et permet la validation par comparaison aux mesures réelles. Pour séparer les effets liés au type de forêt, deux cas d'étude sont présentés : un cas d'étude sur le site des Landes (forêt tempérée peu dense, section V) et un cas sur le site de La réunion (forêt tropicale dense, section VI).

La présente étude comporte donc différentes volets :

1. Etude du signal sur des maquettes "théoriques"
2. Etude du signal sur des maquettes "réelles" :
 - a) Création de maquettes avec différentes méthodes et différentes représentations du paysage, à partir des données disponibles, ou sur la base de représentations théoriques simples.
 - b) Simulation d'acquisitions Lidar (aéroporté et spatial)
 - c) Validation des simulations :
 - comparaison des simulations ALS avec les mesures ALS, pour différents types de maquettes DART sur différents types de peuplements forestiers.

- comparaison des simulation ALS avec les simulations Spatiales
- d) Étude de sensibilité du signal aux paramètres de la scène
- e) Étude de sensibilité du signal aux paramètres capteur

Afin de gérer ces différentes tâches, nous avons mis en place une plate-forme de simulation. Cette plate-forme est décomposée en 4 modules (figure 1) : extraction des données terrain, création des maquettes initiales ("de référence"), création du banc de simulation à partir des simulations de référence, et validation et analyse des résultats.

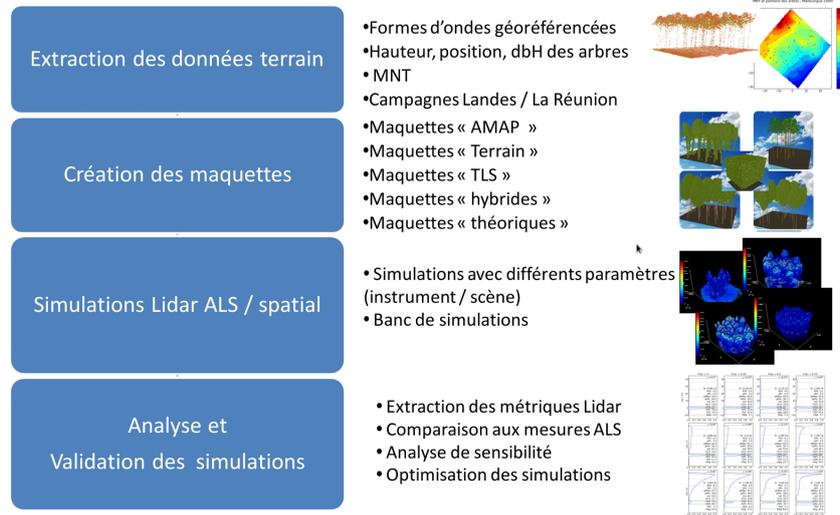


FIGURE 1 – Illustration des différents modules qui composent la plateforme de simulation

Le diagramme de la figure 2 montre la démarche globale de l'étude sur les maquettes réelles : pour chaque parcelle de chaque site d'étude, on génère des maquettes (au format DART) qui nous permettent de simuler des mesures Lidar ALS et spatial. La comparaison des données ALS simulées et mesurées agrégées permet la validation à la fois le modèle de transfert radiatif et des maquettes. Puis, ces maquettes sont modifiées pour étudier la sensibilité du signal aux différents paramètres.

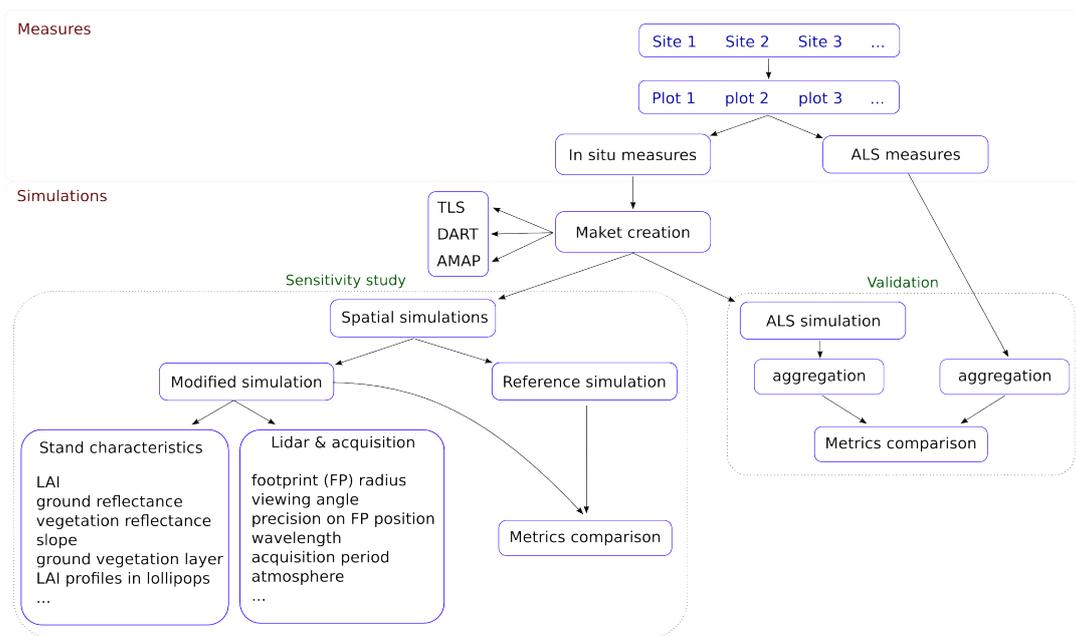


FIGURE 2 – Diagramme présentant la démarche utilisée dans cette étude pour les parties validation et étude de sensibilité

1 Création des maquettes "théoriques"

Afin de mieux comprendre la sensibilité du signal aux différents paramètres forestiers pour *in fine* proposer des algorithmes d'inversion du signal et dimensionner un capteur lidar spatial, une première partie de ce document propose d'analyser les signaux lidar avec deux types de maquettes "théoriques" de complexité croissante : dans le premier cas, la maquette est une simple couche de végétation homogène définie par le LAI, LAD et taux de trouées (section 1). Dans le second cas, un peuplement forestier où les arbres sont représentés par un tronc vertical (triangles) et un houppier ellipsoïdal représenté par des voxels "turbides" (section 2). On appelle "arbres sucettes" ce type de représentation dans DART.

Ce type de représentation permet de faire un lien qualitatif entre des variables définies à l'échelle de la placette (LAI, nombre d'arbre, distribution des hauteurs) et les métriques Lidar, première étape vers l'inversion du signal.

2 Création des maquettes "réelles"

Pour les simulations de placettes réelles, les maquettes DART sont basées sur les données disponibles. Plusieurs approches ont été testées, car un des objectifs de l'étude est de comparer différentes approches pour modéliser la végétation.

La difficulté de création d'une maquette d'une placette forestière existante est grande compte tenu des multiples facteurs à ajuster, sans avoir suffisamment de connaissances a-priori (mesures). Car une maquette qui représente bien une placette forestière doit mimer la réalité sur de multiples points, notamment la répartition 3D de la végétation (*i.e.* troncs, branches, feuilles ou aiguilles), les propriétés optiques des matériaux (répartition, diversité) et la représentation du sol (pente, rugosité, et présence d'herbes, mousses, fougères). De plus, la validité des simulations, basée sur les comparaisons des formes d'onde simulées/mesurées, est contrainte à la fois par une bonne caractérisation de la scène, mais aussi une paramétrisation fidèle de l'acquisition Lidar (paramètres instrumentaux : taille de l'empreinte d'émission et de réception, énergie d'impulsion, et paramètres d'acquisitions : position relative à la placette pour chaque mesure ALS, état de l'atmosphère). Autrement dit, les différences entre le signal observé et le signal mesuré peuvent provenir soit d'une mauvaise paramétrisation de la végétation, soit d'une mauvaise paramétrisation de l'acquisition Lidar, soit d'une erreur du modèle (de transfert radiatif et/ou de canopée) lui-même.

Ainsi, il est nécessaire de comparer des données lidar simulées et réelles avec différentes conditions d'acquisition et sur plusieurs types de peuplement forestier pour valider le modèle. Mais les données disponibles limitent les cas d'étude possibles. Pour cette étude, seules des données petite empreinte (ALS) sur un site de forêt tempérée peu dense, gérée, mono-spécifique et mono-strate (la forêt des Landes, section V) étaient disponibles et correctement géoréférencées. Plusieurs placettes d'âge et de composition différents ont été choisies pour couvrir un ensemble de cas. Elles serviront donc de base pour la validation du modèle. Afin d'élargir l'analyse du signal, l'étude simule d'autre part des données Lidar sur un ensemble de 4 forêts plus denses (tropicales), à plusieurs strates et plusieurs espèces présents sur l'île de La Réunion (section VI).

La figure 3 montre les différents types de représentations de la végétation possibles à partir de mesures terrain, ainsi que les données nécessaires pour les créer.

Pour chacun des deux sites et chaque placette, on a généré une simulation "de référence" pour chaque type de maquette ("AMAP", "TLS", "Terrain" et "Hybride", voir ci-dessous). Cette simulation est construite suivant différentes approches, servira d'une part à la validation du modèle et d'autre part de base pour l'étude de sensibilité. Les types de représentation utilisés ici sont décrits les suivants :

2.1 Maquettes "AMAP"

L'UMR AMAP (botanique et bio-informatique de l'Architecture des Plantes) a développé une suite logicielle qui permet de simuler la croissance des plantes sur la base d'observations et de relevés botaniques (AmapSim, composante d'AmapStudio). Cet outil permet de créer des maquettes d'arbre isolé et récemment d'arbres en peuplement de façon très précise, sous réserve d'avoir bien caractérisé l'espèce à simuler. En effet, le développement des plantes dépend de très nombreux facteurs, et peu d'espèces sont bien caractérisées à ce jour (le pin des landes en fait partie, l'eucalyptus est en cours d'étude). Ainsi, il n'est pas possible à l'heure

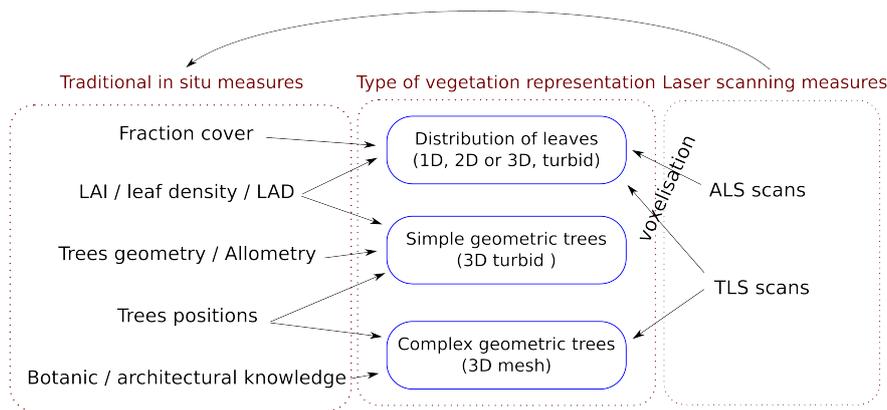


FIGURE 3 – Diagramme décrivant les différents types de représentations de la végétation possibles à partir de mesures terrain, ainsi que les données nécessaires pour les créer

actuelle de simuler avec cette méthode un peuplement tropical qui peut contenir des centaines d'espèce. Néanmoins, les placettes des Landes ont été simulées de cette manière.

Pour chaque placette, les étapes de la création de la simulation de base sont les suivantes :

1. paramétrisation et simulation AmapSim de croissance de pins en peuplement (création d'une scène AmapStudio au format ".ops"), par l'équipe du laboratoire AMAP.
2. export de la scène en ".obj"
3. passage dans Blender pour nettoyage de la scène "obj"
4. import de l'obj dans DART et
5. ajout de la couche herbacée
6. paramétrisation de la scène (propriétés optiques, paramètres d'acquisition, etc.)

2.2 Maquettes "TLS"

Les Lidars Terrestres permettent d'obtenir un nuage de points 3D correspondant à la position des éléments ayant interagi avec le laser. Ce nuage contient donc une importante quantité d'informations sur l'espace scanné. Cependant, la végétation interceptant une partie des faisceaux Lidar émis, plus on s'éloigne de l'instrument plus l'information diminue. Nous avons donc développé un outil qui permet de créer à partir de ces mesures des maquettes sous forme de voxels 3D contenant une valeur de densité de végétation. Cet outil (outil "voxélisation" : voxelSD¹) a nécessité un important investissement, et permet en outre de tester différentes approches d'estimation de la densité de végétation, d'extraire des MNT (Modèles Numériques de Terrain), de visualiser les résultats et de créer directement des maquettes au format DART. Sa validation théorique fait l'objet d'une publication en cours d'écriture (cf. fig 4).

Pour chaque placette, les étapes de la création de la simulation de référence sont les suivantes :

1. Voxelisation des scans TLS correspondant à la placette. La voxelisation se fait à 50 cm de résolution, afin d'avoir un bon compromis entre la précision de la méthode d'estimation de la densité par voxel (meilleure pour de grand voxels) et la précision de la maquette, en particulier les "trous" dans la canopée.
2. fusion des scans voxelisés
3. Création du MNT sur la base de la scène voxelisée, par interpolation des hauteurs des voxels les plus bas ayant au moins un faisceau Lidar entrant. L'interpolation se fait après lissage afin de corriger les effets d'occlusion.
4. Création de la maquette DART en incluant le MNT
5. Ajout des voxels "turbides" calculés par la voxelisation, dans la maquette MNT DART, et paramétrisation de la scène (propriétés optiques, paramètres d'acquisition, etc.)

1. L'outil est disponible sur <https://www.dropbox.com/sh/fb4ab3ocrac6azr/AADIn9BnoRWGQxt90w17aL-7a?dl=0>.

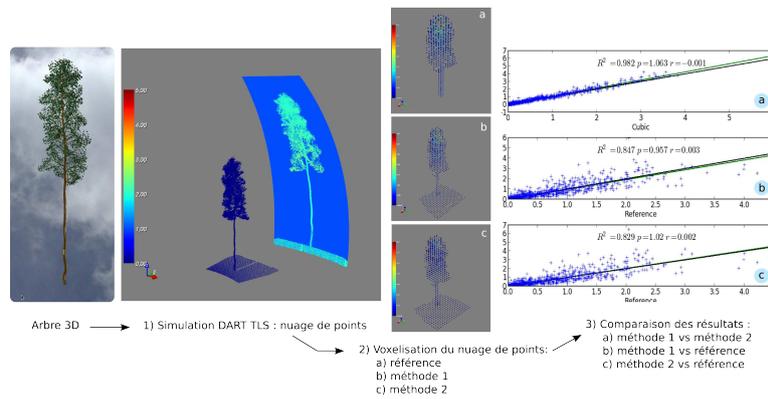


FIGURE 4 – Illustration du processus de validation de l'outil "voxélisation"

2.3 Maquettes "Terrain"

Les relevés terrain permettent de créer des maquettes d'arbre simples au format DART, où les arbres sont représentés avec leur tronc sous forme de triangles et leur houppier sous forme de voxels turbides juxtaposés prenant des formes prédéfinies (*e.g.* ellipsoïde). Dans les houppiers, DART permet la paramétrisation de la distribution des feuilles et des trouées. Cependant, il est difficile en pratique de connaître la bonne paramétrisation pour chaque espèce et les mesures terrain ne les indiquent généralement pas. Ainsi les houppiers sont approxi- més d'après les données bibliographiques disponibles et les "connaissances expertes" qu'il est très difficile de justifier quantitativement.

Pour chaque placette, les étapes de la création de la simulation de référence sont les suivantes :

1. Création des arbres DART à partir des relevés terrain traditionnels (position, dbh, hauteur, base de houppier). La forme des houppiers est supposée ellipsoïdale. Le houppier s'étend verticalement de la hauteur de la première branche morte (mesurée) à la hauteur totale de l'arbre. Si la hauteur de la première branche morte n'est pas mesurée, alors elle est estimée à 1/3 de la hauteur totale pour les pins maritimes. Pour des dimensions horizontales des houppiers, de précédents relevés terrain comportant l'extension horizontale ont permis d'établir une relation entre la hauteur de l'arbre et les dimensions de la couronne : pour des arbres de hauteur $H < 12 m$, le rayon du houppier est donné par $R_c(H) = 0.4.H + Gauss(0, 1.9)$. Pour $H \geq 12 m$, le rayon du houppier $R_c(H) = 0.3.H + Gauss(0, 1.1)$ (figure 5). Pour les pins maritimes des Landes, les houppiers sont divisés en 3 couches qui décrivent de bas en haut respectivement 25, 40 et 35 % de la hauteur du houppier, représentent 5, 40, et 55 % du LAI de l'arbre et sont composés de 80, 60, et 30 % de trous. L'impact de cette discrétisation est étudiée dans l'étude de sensibilité.
2. Création d'un fichier "arbres DART", comportant les dimensions de chaque arbre et leur positionnement suivant les relevés terrain.
3. Ajout de la couche herbacée (pour les placettes des Landes : 1 m de hauteur moyenne, 0.5 m de deviation standard sur la hauteur et 0.2 de LAI)
4. Utilisation du MNT généré par la voxélisation dans la simulation DART
5. Création et paramétrisation de la maquette DART.

2.4 Maquettes "Hybride"

Afin de tester si une approche intermédiaire entre l'utilisation de données TLS voxélisées uniquement et l'utilisation de relevés terrains traditionnels, pouvait mieux répondre aux besoins de la modélisation, nous avons développé une approche qui combine les différentes données. Le TLS est utilisé pour situer et mesurer le dbh des arbres, et les relevés permettent de créer des "arbres DART" avec des houppiers bien définis. Cela permet d'avoir chaque arbre représenté en tant que tel (ce qui fait défaut dans l'approche globale de voxélisation), mais sur une scène potentiellement plus grande, puisque le TLS permet de mesurer des arbres bien au-delà des 15 m de rayon des relevés traditionnels et avec une meilleure précision sur la position des arbres.

Pour chaque placette, les étapes de la création de la simulation de base sont les suivantes :

1. extraction des positions/dbH des arbres avec les points 3D TLS filtrés à 1 m 30 au dessus du MNT

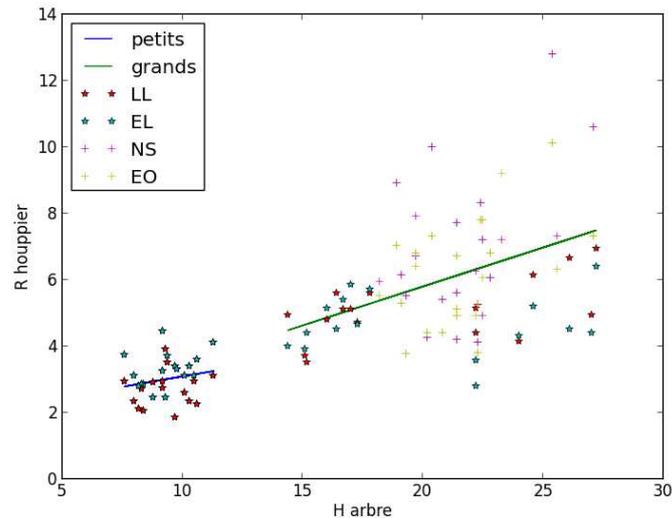


FIGURE 5 – Relations hauteur / dimension horizontale des houppiers de pins des landes. Les lignes bleue et verte correspondent aux régressions linéaires calculées respectivement sur les petits et grands arbres. Deux types de mesures ont été effectuées sur le rayon de la canopée : EL et LL correspondent aux rayons des houppiers mesurés suivant deux axes perpendiculaires (grand et petit axe), tandis que EO et NS sont les rayons mesurés suivant les axes Nord-Sud et Est-Ouest.

2. calcul du "fichier arbres" de DART qui combine les positions et dbh TLS des arbres, avec les arbres DART construits selon la méthode "Terrain" (cf. paragraphe 2.3).
3. Calcul du MNT à partir de la scène voxélisée
4. Ajout de la couche herbacée (pour les placettes des Landes : 1 m de hauteur moyenne, 0.5 m de deviation standard sur la hauteur et 0.2 de LAI)
5. Création et paramétrisation de la maquette DART.

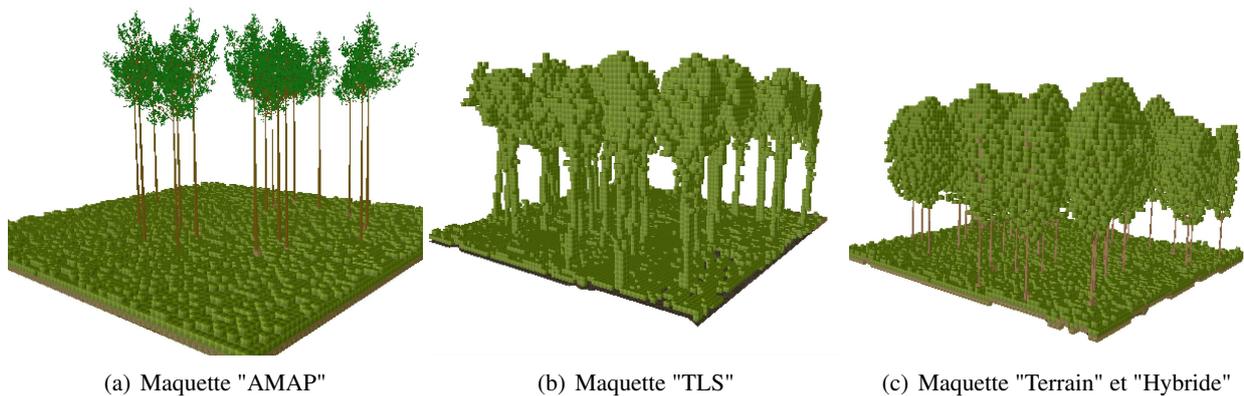


FIGURE 6 – Visualisation 3D d'une parcelle forestière simulée suivant les 4 types de maquette

2.5 La problématique du LAI

Le LAI (Leaf Area Index) représente la surface foliaire par unité de surface d'une placette. Il est utilisé comme valeur de référence pour caractériser la végétation, notamment par la communauté "télédétection" à l'intérieur d'un pixel d'une image satellite. En effet, les premiers modèles de végétation étaient très simples (la végétation était représentée par une couche homogène définie par son LAI et son LAD - Leaf Angle Distribution), car adaptés à une résolution d'image assez grossière (80 m pour les premiers Landsat). Avec la très

haute résolution, l'hyperspectral et le Lidar, le LAI ne suffit plus pour définir la végétation d'une placette. La répartition des "trous" dans la canopée -et donc la structure de la végétation- est au moins aussi importante que les propriétés optiques des éléments.

Ainsi, pour un même LAI, si la canopée n'occupe que la moitié de la placette, la densité à l'intérieur de la couronne sera deux fois plus dense que pour une canopée totalement fermée. Il faut aussi distinguer les "trous" à l'intérieur -ou sous- la canopée, des trouées qui portent sur toute la colonne de végétation (*i.e.* laissant le sol directement visible à la verticale). D'autre part, il faut distinguer le LAI de la scène et le LAI "vu" par le Lidar (*i.e.* calculé sur la zone couverte par le footprint de réception du Lidar).

Ainsi, pour caractériser la végétation des placettes modélisées, il sera toujours indiqué le LAI, la densité moyenne des voxels, le taux de couverture, ainsi que le profil vertical et horizontal du LAI dans le footprint large empreinte.

Différentes approches pour fixer le LAI des placettes ont été testées :

- Approche "TLS" : le LAI est fixé par la voxélisation TLS. Il s'agit alors d'un PAI puisque les troncs et branches sont aussi comptés. Il est alors possible d'appliquer un facteur de multiplication à toute la maquette afin de fixer une valeur de LAI tout en gardant la distribution relative des voxels, ou bien de fixer la densité des voxels pleins et simplement garder leur distribution 3D (paragraphe 4.7)
- Approche "DART" : deux approches sont possibles : soit on fixe le LAI des arbres pour toute la maquette (la densité du feuillage dépend alors de la couverture arborée sur toute la scène), ce qui nécessite de connaître le LAI de la placette au préalable. Soit on fixe la densité du feuillage à l'intérieur des couronnes d'arbres (indépendamment de la taille de la maquette). De cette façon, en créant des arbres "sucette" selon les dimensions et positions inventoriées, on obtient un LAI global des arbres sur la placette. C'est cette approche qui a été utilisée dans cette étude. L'analyse de sensibilité montre l'influence du LAI (paragraphe 4.1) et de la taille des houppiers (paragraphe 4.6).
- approche "AMAP" : La modélisation AMAP permet de contrôler la forme, densité, orientation des "primitives" (objet qui représente "une feuille" ou "un shoot" pour les résineux), pour un arbre donné. Fixant ainsi à la fois le LAI, le LAD, le clumping, etc. Une étude a en parallèle été effectuée par Cécile Antin pour mesurer l'impact de la représentation fine du feuillage des pins maritimes sur le signal Lidar.

3 Simulation des acquisitions Lidar

3.1 Simulation des acquisitions Lidar ALS

Afin de minimiser les différences entre les simulations et les mesures ALS, il est important de reconstituer les mêmes conditions d'acquisition, notamment angulaires. Les acquisitions Lidar correspondant aux placettes sont extraites des données brutes à l'aide du logiciel FullAnalyze. Chaque tir est géoréférencé, puis ceux dont au moins un des échos est situé dans la placette sont écrits dans un fichier texte (avec la forme d'onde rétrodiffusée, les échos extraits, la position du capteur et la direction du tir). Chaque tir est ensuite replacé dans le système de coordonnées DART et écrit dans un fichier, permettant ainsi la simulation de l'acquisition dans exactement les mêmes conditions angulaires.

3.2 Simulation des acquisitions Lidar Spatial

Sur les placettes étudiées ici, il n'existe pas de mesures Lidar spatial (les empreintes IceSat ne passent pas au-dessus de ces zones). Il n'est donc pas possible de comparer les simulations avec des mesures. Cependant, les précédentes études du projet Steam Leaf proposent un dimensionnement qui est pris ici comme point de référence.

3.3 Paramétrage des simulations

Paramètres généraux :

- Longueur d'onde : 1064 nm
- Fréquence d'acquisition : 1 ns
- Pulse gaussien FWHM : 2 ns
- Réflectance sol : 0.4
- Réflectance des troncs : 0.55
- Réflectance des feuilles : 0.57
- Transmittance des feuilles : 0.42

Paramètres d'acquisition :

	Lidar spatial	lidar aéroporté
• Altitude	500 km	500 m
• Énergie du pulse	40 mJ	8 μJ
• Surface du détecteur	0.5 m ² ($R \simeq 0.4$ m)	0.1 m ² ($R \simeq 0.18$ m)
• Rayon du footprint	15 m (17 m en réception)	0.25 m (0.3 m en réception)
• Nombre de photons DART	100000	5000 / tir
• Angle zénithal	3°	

L'analyse de sensibilité montre l'influence sur la simulation de waveforms large empreinte des paramètres de la scène suivants : la réflectance du sol (paragraphe 4.2), la réflectance des feuilles (4.3), le LAI de la couche herbacée (4.5). Ainsi que de l'influence des paramètres capteur suivants : angle de visée (5.1), rayon du footprint (5.2), précision sur la position ("jitter", 5.3).

4 Analyse et validation des simulations

La validation des simulations se fait en comparant les métriques et le coefficient de corrélation extraits des signaux Lidar simulés et mesurés. Pour les WF ALS (simulées ou mesurées), elles sont agrégées à l'échelle d'une acquisition spatiale sur chaque placette avant d'être comparées

4.1 Agrégation ALS pour simuler du Lidar spatial

Les WF "petite empreinte" (*i.e.* ALS) sont agrégées pour simuler une WF grande empreinte. Pour cela, après avoir calculé la hauteur min/max de toutes les WF, on calcule une nouvelle WF qui va de H_{min} à H_{max} , échantillonnée à la fréquence des formes d'onde d'origine (typiquement 1 ns). Chaque "bin" de la WF ALS est

ajouté au “bin” de la waveform cumulée suivant l’intervalle ΔZ correspondant à la position (X, Y, Z) du centre du bin géoréférencé. La répartition de l’énergie au sein du footprint n’est pas prise en compte.

Un travail spécifiquement dédié à l’agrégation de formes d’onde ou de données lidar multi-echo, pour simuler des données full-waveform à large empreinte est mené par Claudia Lavalley au sein de l’équipe. Son rapport sera disponible en fin septembre 2015.

4.2 Comparaison des WF - Métriques Lidar et coefficient de corrélation

Coefficient de corrélation

Deux waveforms (notées X et Y) peuvent être comparées en utilisant le coefficient de corrélation linéaire (ou de Bravais-Pearson), qui est égal à :

$$CC = \frac{S_{xy}}{S_x \cdot S_y} \quad (1)$$

où S_{xy} est la covariance et S_x et S_y sont les écarts-types de X et Y. Cela suppose que les hauteurs de “bins” des deux WF sont égales. Afin de s’en assurer, les WF sont re-échantillonnées sur l’intervalle des altitudes commun aux deux WF.

Métriques Lidar

Afin de 1) comparer les formes d’ondes de l’étude et 2) mieux comprendre la sensibilité de certaines métriques Lidar et la structure de la végétation, nous avons sélectionné une gamme de métriques Lidar adaptées, calculées sur les Wf large empreinte. Certaines métriques sont calculées pour l’ensemble de la WF, et d’autres sont calculées sur les compartiments “végétation” ou “sol” uniquement. Nous avons donc implémenté une méthode qui permette de trouver la hauteur, lorsque c’est possible, qui sépare la WF en deux parties : une partie “végétation” (notée WF_{veg}) et une partie “sol” (notée WF_{sol}). Pour cela, la WF est d’abord normalisée (*i.e.* le total d’énergie de la waveform égale 1), puis filtrée (bruit, suivant un seuil fixé a priori à 0.001), recadrée afin que la hauteur “0” corresponde au pic du sol et enfin lissée. On cherche alors les minima locaux situés au dessus du sol (d’après le MNT moyen). La hauteur de séparation canopée/sol correspond au premier minimum au-dessus du bruit tant que la somme de la WF entre le minimum et le précédent minimum est supérieure à 0. Les métriques Lidar suivantes sont alors calculées (Figure 7) :

- **métriques liées à la hauteur du peuplement :**
 - altM [m] : hauteur maximum de la WF au dessus du bruit
 - ext [m] : extension de la WF au-dessus du bruit. Le seuil pour définir le bruit peut dépendre du bruit atmosphérique et solaire. Il est par défaut fixé à 0.01 % du maximum du signal.
- **métriques liées à la puissance du signal reçu :**
 - N (normalisation) : nombre total de photons reçus (*i.e.* facteur de normalisation exprimé en nombre de photons).
 - pSol (pic du sol, [% d’énergie]) : nombre relatif maximum de photons reçus (dans la waveform normalisée) de la WF_{sol} (en pourcentage, *i.e.* le nombre absolu est obtenu par : $pSol * N / 100$).
 - pVeg (pic de la vegetation) [% d’énergie] : nombre relatif maximum de photons reçus (dans la waveform normalisée) de la WF_{veg} (en pourcentage d’énergie, *i.e.* le nombre absolu est obtenu par : $pVeg * N / 100$)
 - iVeg [% d’énergie] : proportion d’énergie (par rapport à l’énergie totale) provenant de la végétation.
- **métriques liées à la distribution verticale du LAI :**
 - rh15, rh50, rh85 (Relative Height, [% de la hauteur max]) : correspondent aux δZ de la WF_{veg} calculés aux percentiles (resp. 15%, 50%, 85%), exprimés en pourcentage de la hauteur totale (rh0). rh15 est donc la profondeur de pénétration correspondant aux 15 premiers pourcents de l’énergie de la waveform ; rh50 est la profondeur entre 15% et 50% de l’énergie la waveform ; et rh85 est la profondeur qui sépare les hauteurs pour lesquelles on a atteint 50% et 85% de l’énergie la waveform. Comme ces métriques sont liées à la distribution verticale relative des feuilles, elles permettent la comparaison de forme d’ondes obtenues sur des peuplement de hauteurs différentes mais de

structure verticale identique (*e.g.* un peuplement jeune et vieux d'un certain type d'arbre auront potentiellement les mêmes profils verticaux, mais des hauteurs absolues différentes)

- altP [m] : hauteur du pic maximum de la WF_{veg}

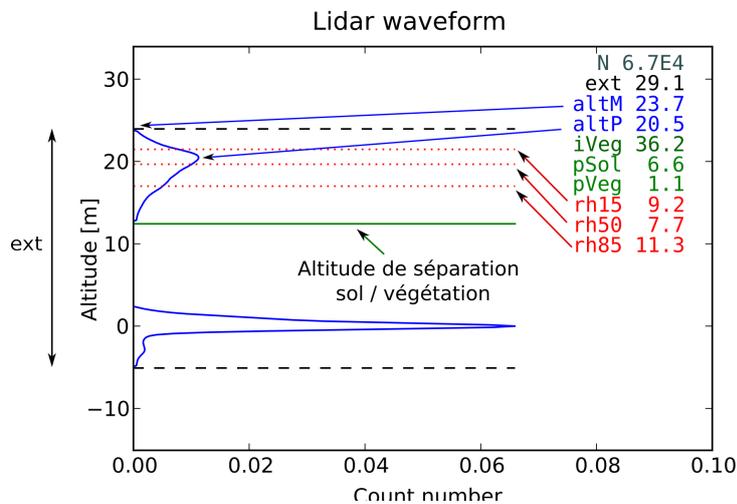


FIGURE 7 – Illustration des métriques utilisées dans cette étude

Ces métriques, prises séparément ou combinées, renseignent sur la structure de la végétation. Mais, même avec des métriques judicieusement choisies, retrouver les propriétés du peuplement à partir de métriques Lidar (*i.e.* inverser le signal) reste complexe. Cela nécessite de lever des ambiguïtés liées à la multiplicité et la complexité des paramètres forestiers, par exemple en contraignant les méthodes d'inversion à des types de forêt spécifiques.

Problèmes des indicateurs

La structure de la végétation étant en soi un sujet complexe, il est difficile de faire un lien univoque entre une métrique et un paramètre structurel. Et même en admettant que l'on puisse établir un lien (par exemple statistique) entre une ou plusieurs métriques Lidar et des paramètres du peuplement, ce lien peut dépendre du type de peuplement, de l'échelle de la mesure et potentiellement des paramètres capteur. Le choix des métriques conditionne les algorithmes d'inversion du signal. C'est pourquoi il est important de tester différentes métriques, étudier leur pertinence et minimiser leur corrélation, pour en choisir un nombre limité mais suffisant. Plusieurs questions se posent donc, et bien qu'abordées ici, elles dépassent l'objet de la présente étude :

- Dans quelle mesure les métriques sont-elles liées à un type de peuplement plutôt qu'à des paramètres biophysiques (*e.g.* les trouées se mesurent-elles de la même façon sur une savane ou sur une forêt tempérée) ?
- Les métriques sont-elles indépendantes de l'échelle de mesure (*i.e.* la taille de l'empreinte) ?
- Doivent-ils être explicitement liés aux paramètres biophysiques ou bien une approche purement statistique suffit ?
- Comment dépendent-ils du traitement embarqué du signal (*i.e.* l'électronique du capteur, la calibration radiométrique, etc.) ?

Ces questions de recherche sont en cours d'étude par la communauté, auxquelles cette étude apporte des éléments significatifs.

IV Maquettes "théoriques"

Dans cette section, l'étude de cas théoriques est présentée. On cherche à mieux comprendre l'impact du LAI et de sa distribution globale (trous, trouées, densité) sur les métriques Lidar. C'est aussi une section qui montre les façons les plus simples de modéliser la végétation. Dans le premier cas, on s'intéresse à une couche homogène de végétation. Dans le second cas, on considère une distribution d'arbres ayant une allométrie donnée, dont on fait varier les paramètres principaux que sont : la hauteur maximale moyenne et le nombre d'arbre (densité de tiges), pour un peuplement mono-strate et bi-strate.

Ces cas sont aussi intéressants du point de vue de l'inversion du signal, puisqu'un des objectifs de l'inversion de données Lidar est de retrouver un profil de LAI à partir de données Lidar large empreinte. Plus précisément, pour retrouver un profil de LAI, on pose l'hypothèse que la végétation vue par le lidar peut être définie simplement par son profil de LAI et éventuellement son profil de trouées (sans tenir compte des différences de réflectance, de la présence de bois, etc). Ces profils pouvant être dans un second temps analysés en termes de "type de peuplement", distribution d'arbre, etc. Dans cette section, on mesure donc quel est l'impact du LAI et des trouées dans une telle représentation de la végétation.

1 LAI, taux de couverture, clumping : étude de sensibilité aux paramètres d'un peuplement théorique homogène

Dans cette partie, la maquette (théorique) est constituée d'une couche de végétation allant de 10 m à 40 m au dessus du sol, dont la densité est homogène (horizontalement et verticalement) et pour laquelle on fait varier le taux de trous et le LAI. Le taux de trous (α) détermine le pourcentage de voxels que l'on va vider de toute matière (*i.e.* feuillage). La matière enlevée est rajoutée aux voxels non-vides, afin de conserver le LAI global.

Deux cas sont considérés : dans le premier cas (figure 9), les trous sont aléatoires dans tout le couvert, ce qui correspond à un effet de "clumping" (la densité foliaire ρ_f des voxels pleins est plus grande, mais le LAI global ne change pas, et tous les rayons sont atténués par la végétation). Dans le second cas (figure 11), les trous sont portés sur toute la colonne de végétation (figure 8). Le taux de trouée est alors l'inverse du taux de couverture ($T_c = 1 - \alpha$), donc une partie du rayonnement ne sera pas (ou très peu pour des tirs obliques) interceptée par la végétation avant d'atteindre le sol.

Sous forme d'équations, on a à l'échelle de la maquette :

$$\rho_f = \frac{S_f}{A.H.(1 - \alpha)} \quad (2)$$

avec S_f la surface foliaire, A l'aire sur laquelle on calcule le LAI, H l'épaisseur du couvert et α le taux de trouées ($\alpha < 1$). On a donc :

$$LAI = \frac{S_f}{A} = \frac{\rho_f}{H.(1 - \alpha)} \quad (3)$$

On peut exprimer la transmittance de la végétation suivant :

$$T_{veg} = T_c . e^{-G.\rho_f/(H.\cos(\theta))} \quad (4)$$

où G est la section efficace d'interception des feuilles (qui dépend du LAD - Leaf Angle Distribution)

1.1 Clumping

En l'absence de trous ($\alpha = 0$), un faible LAI produit une forme d'onde relativement homogène (faible décroissance) au niveau de la végétation, et un pic du sol fort ($iVeg = 21\%$). Pour un LAI de 0.5, le rh15 est de 10 % (3.5 m de profondeur dans le couvert) et les rh50 et rh85 sont d'environ 25% m chacun.

Quand le LAI augmente :

- Le signal augmente (N ↗)
- Le pic du sol diminue ($iVeg$ ↗) et peut devenir quasi-invisible ($iVeg = 98\%$ @LAI = 8)
- altP augmente.
- rh15, rh50 et rh85 diminuent (rh15 diminue plus vite que rh50, qui diminue lui-même plus vite que rh85).

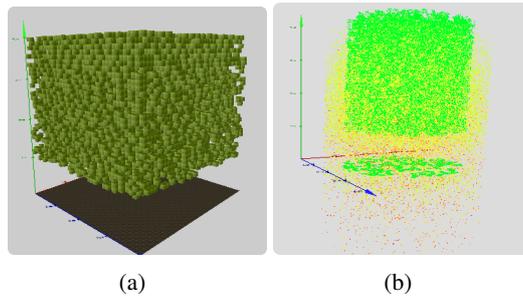


FIGURE 8 – a) Vue 3D de la maquette théorique ($LAI = 0.5$, $\alpha = 0.75$) avec trouées sur toute la colonne et b) Vue 3D des retours Lidars enregistrés

Quand le taux de trous dans la végétation augmente (*i.e.* clumping plus important), la densité moyenne des voxels "pleins" augmente et :

- Le signal diminue ($N \searrow$), car la végétation intercepte davantage de lumière et renvoie une fraction plus petite que si elle avait été interceptée et réfléchiée par le sol.
- Le pic du sol diminue ($iVeg \nearrow$)
- $rh15$, $rh50$ et $rh85$ restent relativement stables (légère augmentation + variation aléatoire quand le taux de trous est fort)

On voit donc un déplacement du barycentre de la waveform vers le haut, dû à la plus forte interception de la lumière par le haut du couvert, et donc moins de photons qui atteignent le bas du couvert. Les métriques concernant la hauteur du peuplement ($altMax$ et ext) sont logiquement peu impactés par un changement de LAI ou de taux de trous.

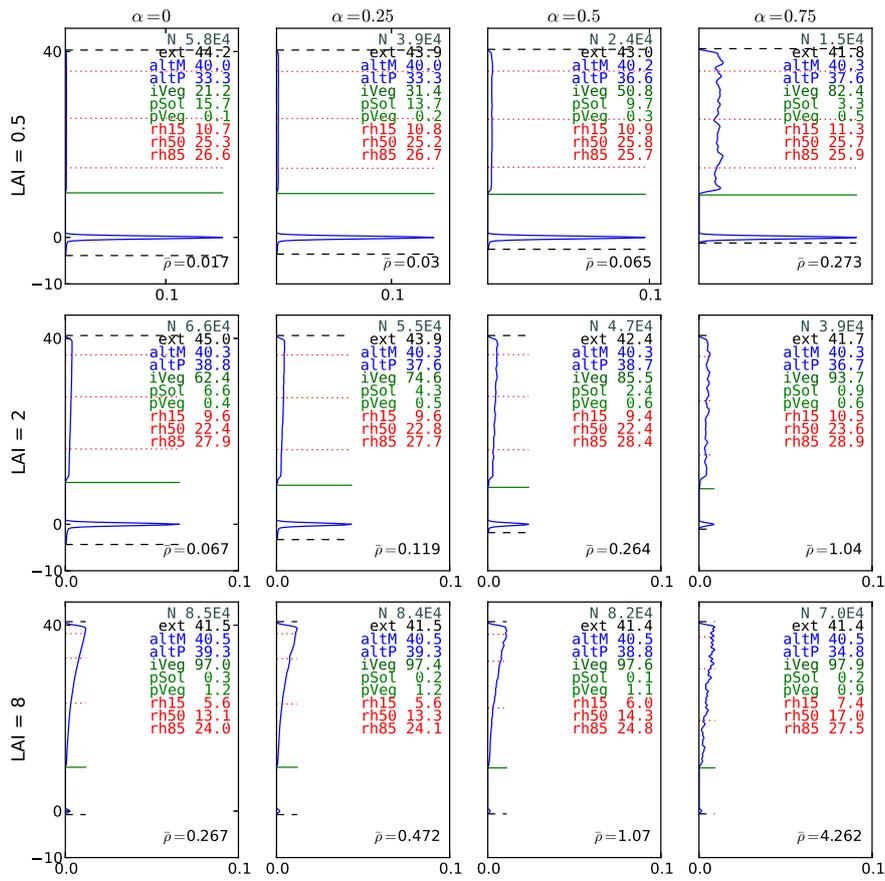


FIGURE 9 – Waveforms (et métriques Lidar) simulées sur une maquette théorique définie par son LAI et son taux de voxels vides aléatoirement choisis. La densité des voxels est indiquée en haut à droite de chaque figure.

1.2 Taux de couverture

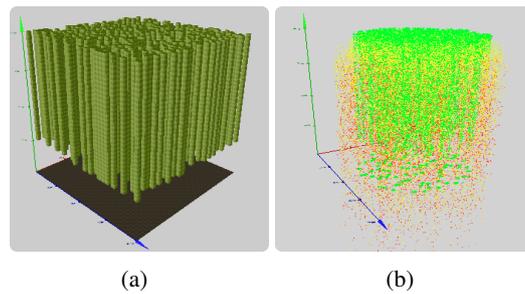


FIGURE 10 – a) Vue 3D de la maquette théorique ($LAI = 0.5$, $\alpha = 0.75$) avec trous (clumping) et b) Vue 3D des retours Lidars enregistrés

La figure 11 montre les waveforms obtenues sur une maquette théorique définie par son LAI et son taux de couverture. On peut observer les mêmes tendances : l'augmentation des trouées (*i.e.* diminution du taux de couverture) à LAI constant, entraîne une diminution du signal (N diminue) et une augmentation de la part provenant de la végétation ($iVeg$ augmente), à cause de l'augmentation de la densité de végétation en dehors des trouées. Aussi, le pic de la végétation est plus marqué ($rh15$ diminue), avec une décroissance du signal plus rapide juste après le pic.

Plus le taux de trouées augmente (*i.e.* T_c diminue), plus le pic du sol est visible (la transmittance augmente quand T_c augmente), car une partie du signal atteint toujours le sol directement (sans interception de la végétation).

Note : les trouées étaient ici sur des colonnes de 1 m, mais l'effet serait le même si au lieu de choisir aléatoirement la position des trouées, on avait fait "un trou" plus ou moins grand, dans la mesure où on ne tient pas compte de la répartition de l'énergie dans le footprint.

1.3 Conclusion

Cette courte étude théorique nous permet de mieux appréhender le comportement des métriques Lidar et donc du signal lui-même par rapport à des variables globales (LAI, clumping, taux de couverture) par opposition aux variables forestières "à l'arbre". Le LAI et sa répartition horizontale (clumping et surtout trouées) jouent un rôle primordial sur la part du signal provenant de la végétation, la possibilité de "voir le sol" dans le signal, ainsi que sur le niveau du signal (métrique N). Les métriques rh ($rh15$, $rh50$ et $rh85$) sont d'autant plus influencées par le taux de trouées que le LAI est fort. Mais la répartition verticale du LAI (*i.e.* le profil de végétation) a potentiellement un impact beaucoup plus important sur les métriques rh . Quant aux métriques "ext" et "altMax", elles ne sont pas du tout sensibles à la distribution horizontale du LAI, mais plutôt à la hauteur du peuplement, et pourraient donc être reliées au type ou au stade végétatif du peuplement. La métrique "ext" est cependant assez sensible au bruit, puisqu'elle dépend du seuil fixé pour filtrer le bruit.

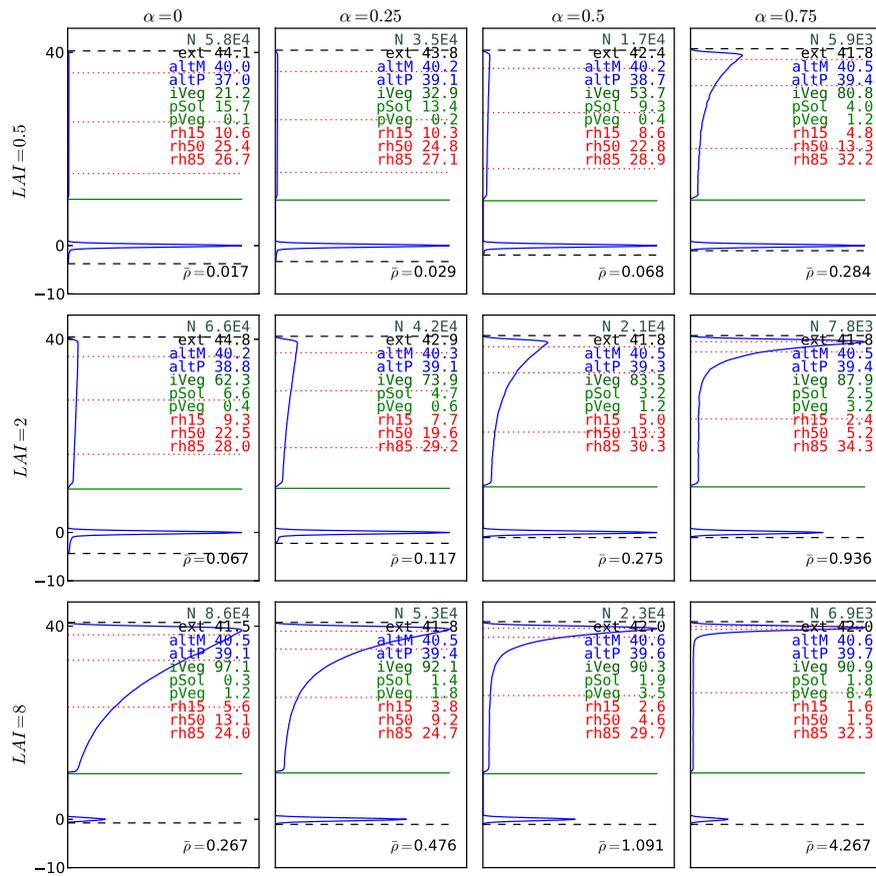


FIGURE 11 – Waveforms (et métriques Lidar) simulées sur une maquette théorique définie par son LAI et son taux de trouées. La densité des voxels est indiquée en haut à droite de chaque figure.

2 Influence de la macro-structure forestière : peuplement théorique mono- et bi-strate

Un outil de création d'arbres "sucettes" pour maquettes DART a été développé (DartTreeGenerator). Il permet de créer un peuplement théorique avec des arbres sous formes de sucettes directement dans une simulation DART. Il utilise des allométries permettant de relier la hauteur des arbres à leurs dbh et dimensions de couronne. Ces allométries ont été calculées sur la base de relevés terrains, notamment des Landes, ainsi que par des hypothèses "expertes". Mais l'intégration de nouvelles allométries peut se faire simplement.

Il permet de générer un ensemble de "couches". Une "couche" peut représenter une espèce d'arbre, ou bien un type d'arbre (commun à plusieurs espèces) ou encore une strate de la végétation (tout types et espèces d'arbre confondus). Chaque couche est définie par : le nombre d'arbres (N), la hauteur totale moyenne des arbres ($H_{max,couche}$), l'extension horizontale ($d_{xy,couche}$) et verticale moyenne ($d_{z,couche}$) de la couronne. Chaque arbre sera généré par un tirage aléatoire gaussien (noté $gaus(moyenne, std)$) pour les dimensions, et tirage aléatoire uniforme (noté $uni()$) pour la position :

1. hauteur totale : $H_{max,arbre} = gaus(H_{max,couche}, 0.1 * H_{max,couche})$
2. hauteur de la base de la couronne : $H_{baseCouronne,arbre} = gaus(H_{max,arbre} - d_{z,couche}, 0.1 * H_{max,arbre} - d_z)$
3. extension horizontale du houppier : $d_{xy,arbre} = gaus(d_{xy,couche}, 0.2 * d_{xy,couche})$
4. extension verticale du houppier : $d_{z,arbre} = d_{z,couche}$
5. diamètre du tronc au sol : $dbh_{base,arbre} = H_{max,arbre} * gauss(0.015, 0.005)$ (0.015 et 0.005 ont été calculés sur les arbres des landes)
6. position : La scène est divisée en N parties de $100 m^2$, et chaque arbre est placé aléatoirement dans la partie qui comporte le moins d'arbre, afin de distribuer les arbres de façon relativement homogène.

Ainsi un peuplement peut être généré avec peu de paramètres, ce qui facilite ensuite l'analyse des résultats. Un exemple de simulation est donné par la figure 12.

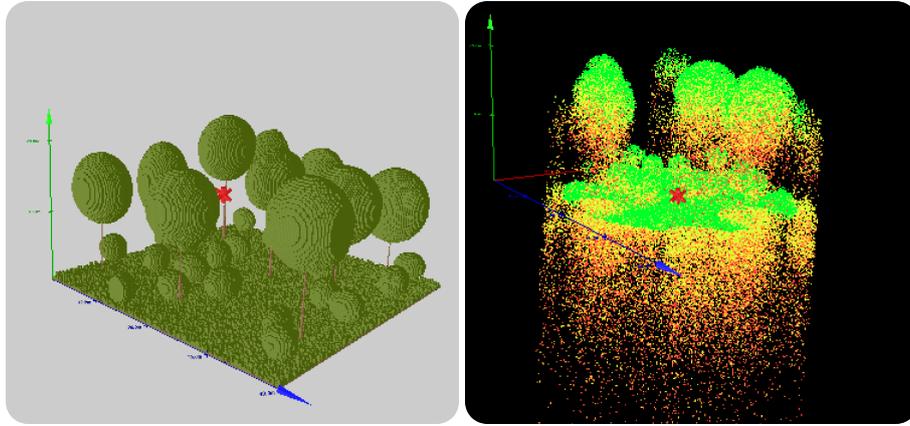


FIGURE 12 – Exemple d'une placette générée par l'outil "DartTreeGenerator" (vue 3D à gauche, photons d'une waveform simulée à droite), avec les paramètres suivants : 1^{ère} couche : $N = 10$, $H_{max} = 20$, $d_{xy} = 9$, $d_z = 10$; 2^{ème} couche : $N = 25$, $H_{max} = 5$, $d_{xy} = 4$, $d_z = 4$

2.1 Végétation mono-strate

Dans cette première partie, on considère un peuplement mono-strate, dont on va faire varier la densité de tiges (*i.e.* le nombre d'arbres $N \in [20, 40, 60]$ arbres répartis sur $1600 m^2$) et la hauteur totale moyenne des arbres ($H_{max,couche} \in [5, 15, 25, 35]$ m). Pour simplifier l'étude (*i.e.* diminuer le nombre de paramètres), nous avons en plus lié les dimensions des houppiers à la hauteur totale des arbres : $d_{z,couche} = 0.5 \times H_{max,couche}$ et $d_{xy,couche} = 0.4 \times H_{max,couche}$. La figure 13, montre la distribution du LAI (horizontale et verticale) des différentes placettes simulées.

La figure 14 montre les WF grande empreinte simulées sur ces placettes. Elle montre une très forte corrélation entre le profil vertical du LAI et la forme d'onde. Cela tend à montrer qu'un instrument lidar spatial

permettrait potentiellement de mesurer le profil de LAI pour un peuplement dont le taux de couverture est inférieur à 80 % avec une bonne précision. Au delà de 80% de taux de couverture, et si le LAI est supérieur à 2, il semble nécessaire d'obtenir une information extérieure sur l'altitude du sol pour correctement interpréter le signal.

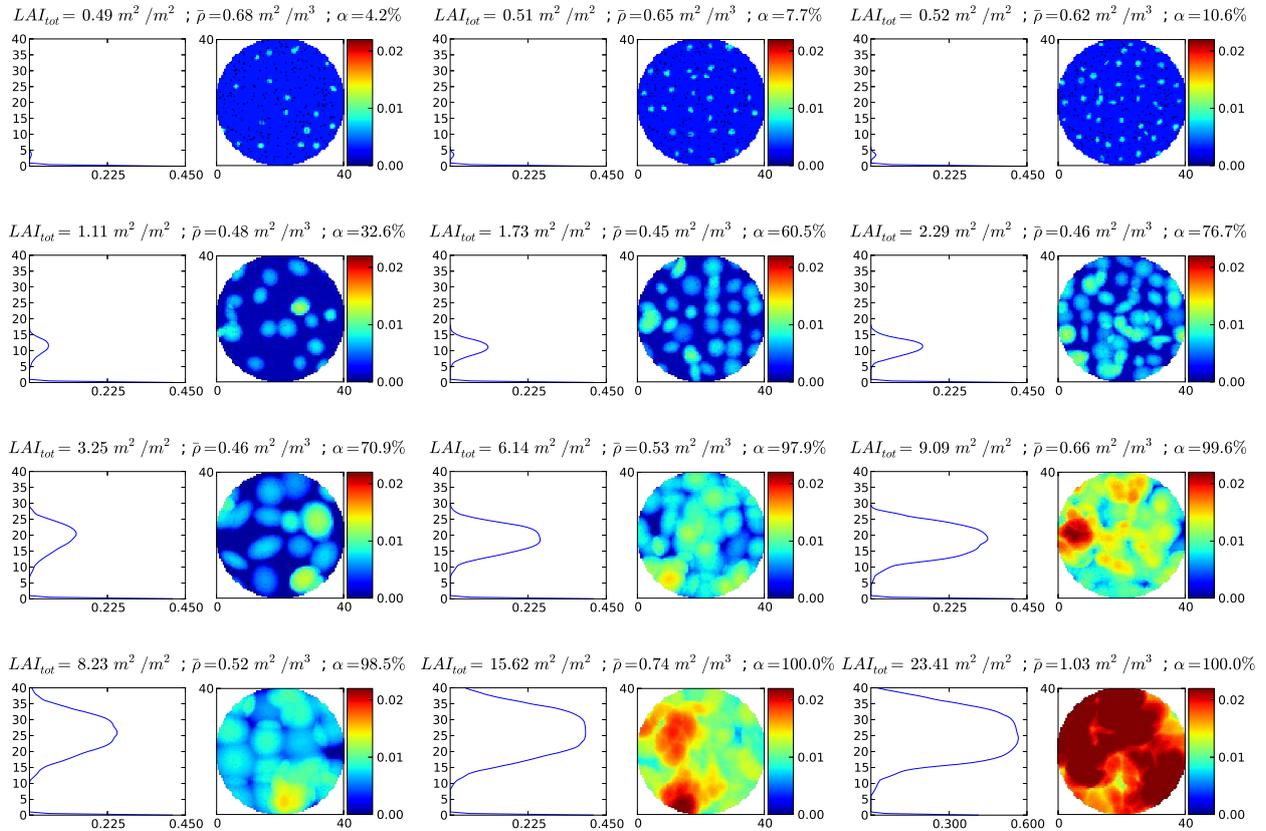


FIGURE 13 – Distribution (profil vertical et horizontal 2D) du LAI des simulations mono-strates. De gauche à droite : la densité des tiges augmente (20, 40, et 60 arbres), de haut en bas : la hauteur de la strate et donc la taille des couronnes augmente ($h_{Max} = 5, 15, 25, 35$ m)

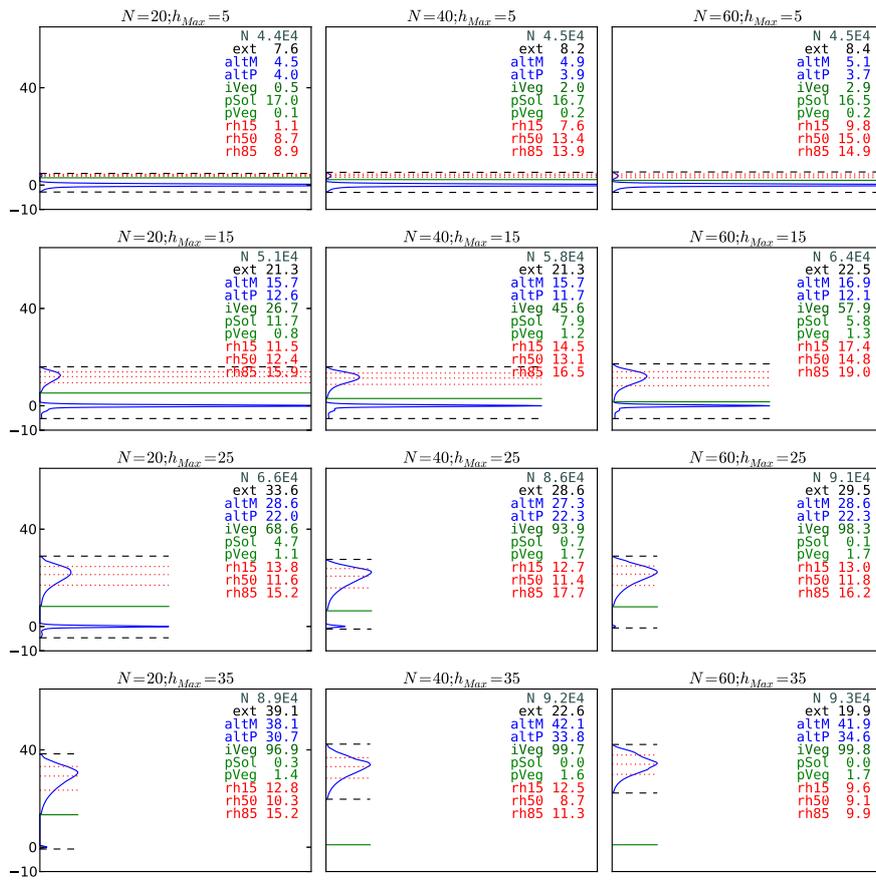


FIGURE 14 – Waveforms (et métriques Lidar) calculées sur un peuplement théorique mono-strate, avec un nombre d'arbre croissant (de gauche à droite) et une hauteur maximale croissante (de haut en bas)

2.2 Végétation bi-strate

Dans cette seconde partie, on considère un peuplement à deux strates. Ici encore, nous avons lié les dimensions des houppiers à la hauteur totale des arbres ($d_{z,couche} = H_{maxcouche}/2$ et $d_{xy,couche} = H_{maxcouche} \times 0.4$). Pour étudier seulement l'impact sur le signal de la hauteur de la strate intermédiaire, on fixe le nombre d'arbres ($N_1 = 10$ pour la couche dominante, et $N_2 = 20$ pour le sous-bois) et la hauteur des arbres dominants ($H_1 = 35$ m). On ne fait varier que la hauteur totale des arbres du sous-bois (et donc la dimension des houppiers proportionnellement). La densité moyenne de végétation dans les houppiers est fixé à $0.4 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Quatre cas sont considérés :

1^{er} cas : $H_2 = 10$. Le LAI est alors égal à 0.85, et le taux de couverture à 25 %

2^{ème} cas : $H_2 = 15$. Le LAI est alors égal à 3.64, et le taux de couverture à 84 %

3^{ème} cas : $H_2 = 20$. Le LAI est alors égal à 8.32, et le taux de couverture à 93 %

4^{ème} cas : $H_2 = 25$. Le LAI est alors égal à 5.99, et le taux de couverture à 97 %

La figure 15 montre la distribution du LAI résultant de la distribution des arbres (2D horizontal, et 1D vertical) et les WF simulées associées. On peut y voir que le signal est très fortement corrélé au profil de LAI. En dehors des effets dûs à la part aléatoire de la création des arbres (légère variation des hauteurs d'arbre), lorsque la hauteur du sous-bois augmente, le LAI et le taux de couverture augmentent et on retrouve l'augmentation du signal et diminution de la part du sol (comme pour un peuplement mono-strate). En revanche, on peut observer Les métriques pSol et rh* sont les plus affectées par le sous-bois (diminution de pSol et augmentation de rh85 avec la hauteur du sous-bois). Rh15 est affecté à partir d'une hauteur de sous-bois de 20 m, c'est-à-dire quand la hauteur des arbres du sous-bois dépasse le moitié de la hauteur des arbres dominants. Il y a donc bien une forte corrélation entre la stratification verticale de la canopée et les métriques rh.

Cette étude montre brièvement qu'il est possible, pour ce type de peuplement (et avec ce type de représentation de peuplement) 1) d'estimer la hauteur de la strate dominante grâce aux métriques altM (hauteur maximale des arbres), altP (hauteur de la plus grande densité de végétation, *i.e.* centre du houppier), puis 2) d'estimer la hauteur et la distribution verticale des arbres de la couche dominée en utilisant les facteurs rh. L'intensité du signal mesuré et l'intensité relative des pics du sol et de la végétation renseignent sur la densité et le taux de couverture de la végétation.

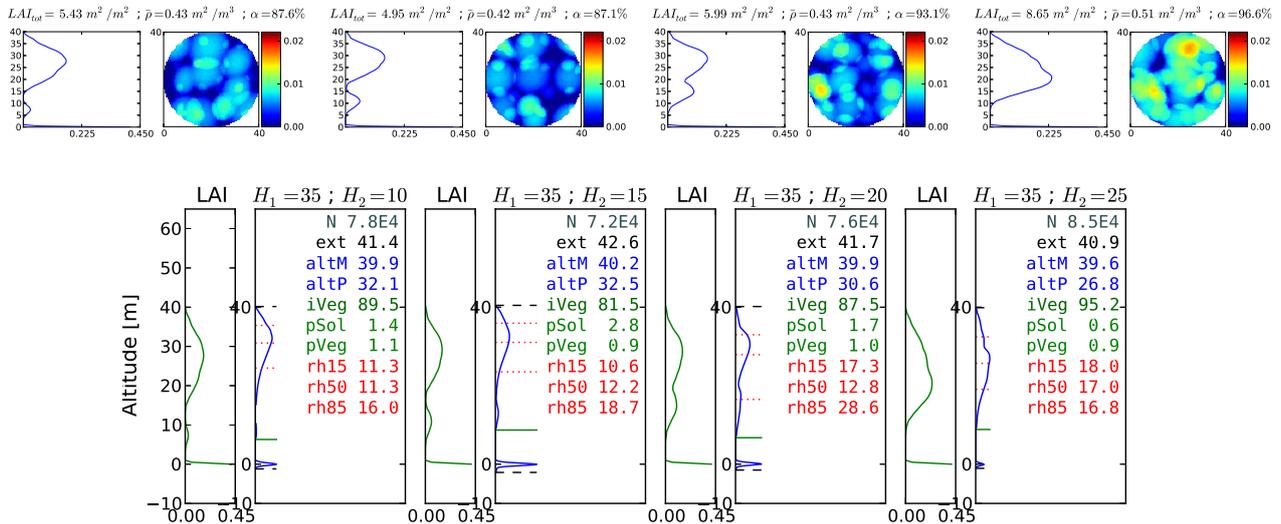


FIGURE 15 – LAI et WF simulées sur une placette forestière à deux strates de végétation. En haut : distribution horizontale 2D du LAI, en bas : profil vertical du LAI et formes d'onde associées. De gauche à droite : l'altitude des deux strates augmente (resp. 15 m, 25 m et 35 m pour la couche dominante, et 5 m, 15 m, et 20 m pour la couche de sous-bois)

V Site des Landes (forêt tempérée de résineux)

1 Données

Les relevés terrain effectués en 2011 comportent pour 59 placettes des relevés traditionnels. Ils contiennent la position du centre de la placette, l'âge estimé du peuplement, et les positions, dbh, hauteurs totale, hauteur de la première branche morte et de la première branche vivante, ainsi que l'essence de tous les arbres dont le dbh est supérieur à 7.5 cm, dans un rayon de 15 m (ou 20 m, ou 6 m suivant l'âge du peuplement). Certains relevés sont incomplets (pas de mesure de hauteur totale ou de hauteur de la première branche, etc...).

Les données ALS ont été effectuées par Syntegra en 2011 (cf rapport en annexe A). A partir des données brutes (fichiers Rieg1) ont été extraites les formes d'onde et les échos sur les placettes par le logiciel FullAnalyze. Des relevés TLS ont été effectués sur 7 placettes (figure 16). Ils sont constitués de 6 scans par placette. Ces placettes avaient été choisies lors de la campagne terrain pour leur diversité (en terme de hauteur, âge, sous-bois). Ce sont donc ces placettes qui ont été choisies pour effectuer l'étude (validation et sensibilité).



FIGURE 16 – En bleu clair : position des placettes des Landes (sur image satellite google)

Le paragraphe 2 analyse les différentes maquettes des différentes placettes. Puis les waveforms ALS simulées et mesurées sont comparées (3.1). Le paragraphe suivant (3.2), montre la comparaison des WF simulées petite empreinte cumulées vs large empreinte. Enfin, une analyse de sensibilité est menée sections 4 (paramètres de la végétation) et 5 (paramètres de l'acquisition Lidar)

Cette section présente les maquettes réalisées sur les placettes des Landes, ainsi que la comparaison des WF simulées avec les WF mesurées. Une étude de sensibilité montre l'impact des principaux paramètres.

2 Simulation des Maquettes initiales

La figure 18 montre une vue 3D des maquettes DART et une photo de chaque placette. La figure 19 montre pour chaque type de maquette et chaque placette simulée : la répartition horizontale (2D) et verticale (1D), ainsi que le LAI dans le footprint (de la WF spatiale), la densité moyenne ($\bar{\rho}$ en m^2/m^3) et le taux de couverture (α). Le tableau 17 résume les caractéristiques des maquettes, avec "LAI TLS" le LAI obtenu par voxelisation des données TLS (au-dessus de 2m de hauteur), "LAI hybride" le LAI résultant de la création de la maquette en ayant fixé les dimensions des arbres et la densité du feuillage dans les houppiers, T_c TLS [%] le taux de couverture des maquettes TLS, et "nb Arbres TLS" le nombre d'arbres obtenus par identification des arbres depuis le nuage de points TLS.

n°	n° relevé	âge	Hauteur max	LAI TLS	LAI Hybride	T_c TLS [%]	nb Arbres TLS
1	1	40	25	1.7	0.78	79	37
2	14	62	33	2.13	1.23	89	30
3	16	7	8	1.27	0.27	62	107
4	17	60	30	2.0	1.09	77	31
5	18	16	17	2.78	1.22	93	154
6	19	22	21	1.97	1.03	88	73
7	24	19	20	2.09	0.88	85	82

FIGURE 17 – Caractéristiques des maquettes des placettes des landes

A noter que la placette 3 étant constituée d'arbres jeunes et petits, les relevés des arbres ne s'est effectué que sur un rayon de 6m, et donc seuls 10 arbres ont été relevés sur le terrain. La maquette "Terrain" sous-estime donc la présence des arbres dans le rayon du footprint (15m).

Les MNT calculés à partir des scans TLS ont une très faible amplitude (*i.e.* le sol est quasiment plat) sur toutes les placettes.

Globalement, les maquettes "Terrain" et "hybrides" sont assez similaires sur chacune des placettes en terme de LAI et densité moyenne. Les maquettes "TLS" ont un LAI supérieur d'un facteur 2 environ. Le taux de couverture est similaire entre les maquettes "TLS" "Terrain" et "hybride". Les maquettes AMAP (où la végétation est modélisée par une juxtaposition de triangles) ont des valeurs assez différentes : un taux de couverture plus faible mais une densité moyenne plus élevée (donc une répartition plus contrastée). Le LAI résultant est plus élevé que dans les autres représentations, mais comme il est beaucoup plus concentré spatialement, l'impact sur les formes d'onde n'est pas certain.

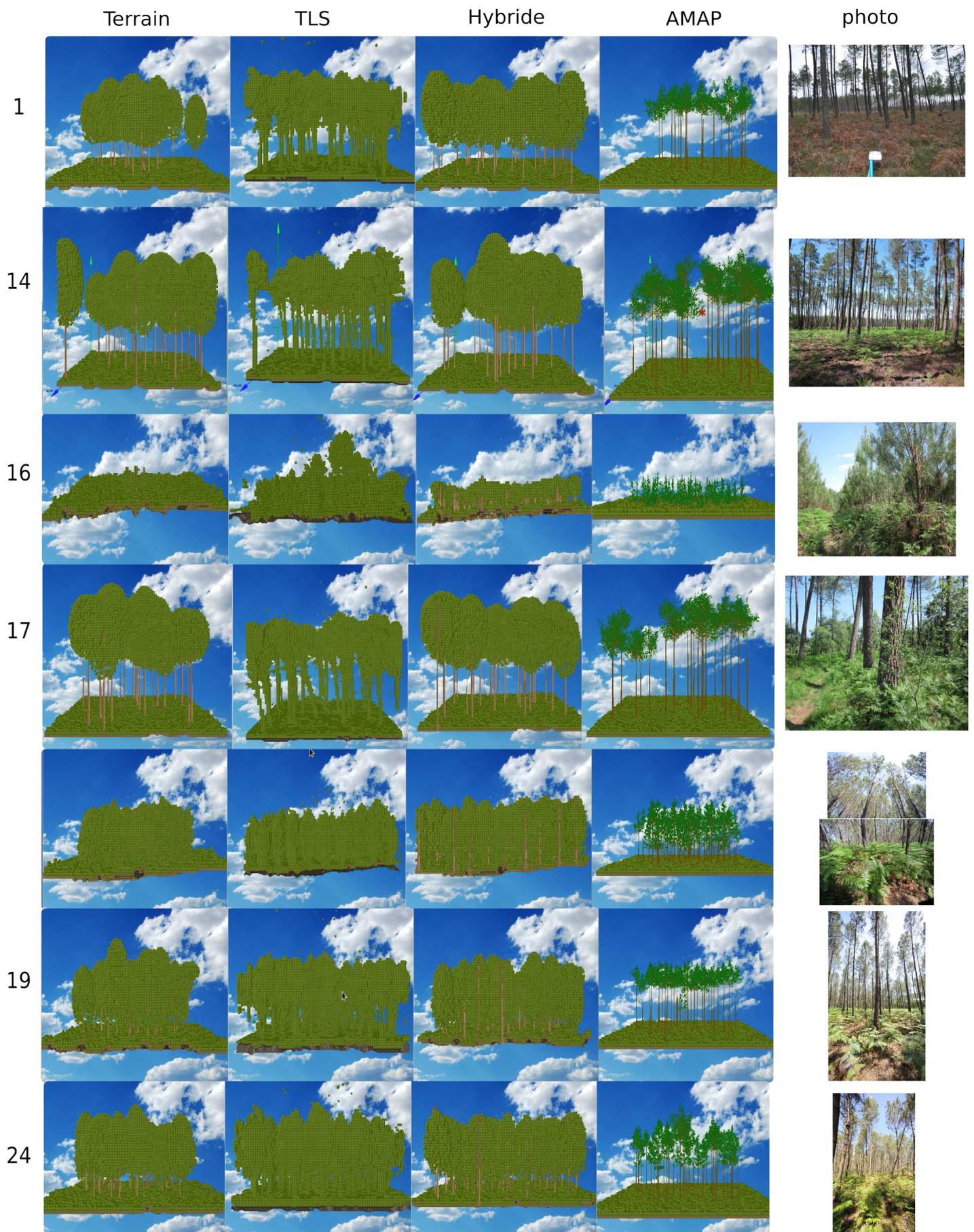


FIGURE 18 – Placettes DART (de haut en bas) : visualisation des maquettes simulées avec différentes approches (de gauche à droite). Le chiffre à gauche indique le numéro de la placette suivant les relevés terrain. A droite une photo de chaque placette

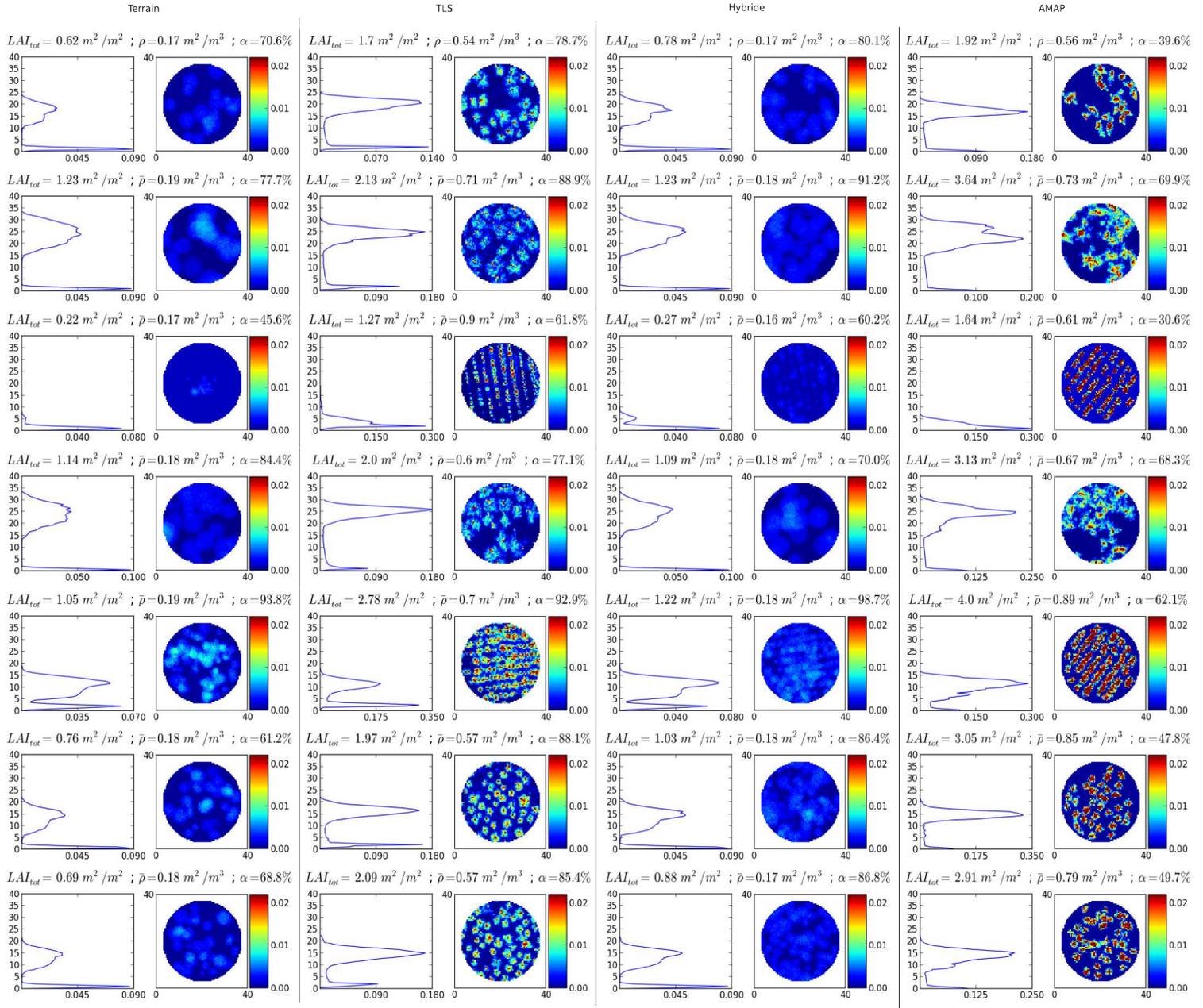


FIGURE 19 – Visualisation de la répartition du LAI (profil et répartition 2D dans un footprint de 17 m de rayon) par placette (de haut en bas) et par type de maquette (de gauche à droite)



FIGURE 20 – Waveforms et métriques Lidar. de haut en bas : les 7 placettes étudiées. De gauche à droite : Waveforms ALS mesurée cumulée, Waveforms ALS simulées cumulées (maquettes Terrain, Hybride, TLS, AMAP), Waveforms spatiales large empreinte (maquettes terrain, Hybride, TLS, AMAP)

3 Simulation des WF

La figure 20 montre les WF (et les métriques associées) ALS mesurées cumulées, les WF ALS simulées cumulées, et les WF spatiales simulées, pour chaque placette et chaque type de maquette.

3.1 Comparaison des WF ALS cumulées : mesurées vs simulées

Les WF ALS mesurées cumulées ont un fort pic du sol et un pic de la végétation faible ($iVeg < 30\%$), en lien avec les caractéristiques des forêts des Landes (peuplement assez ouverts, avec une densité de végétation plutôt faible, peu de pente et peu de sous-bois). On peut observer "sous le sol" une traînée importante et un pic un peu étrange. Certainement du aux effets de diffusions multiples combinés aux effets de l'instrument ("ringing"², bruit instrumental), et à des imprécisions sur le géoréférencement des formes d'onde, ces artefacts peuvent causer quelques problèmes lors de la comparaison avec les formes d'onde simulées, puisque les erreurs de ringing et du bruit instrumental ne sont pas modélisées. On peut noter que l'algorithme de séparation des waveforms en deux parties (végétation/sol) fonctionne bien sur ce type de peuplement (où le sol et la végétation sont assez distincts), et procure donc des métriques fiables.

La figure 21 montre les erreurs moyennes des métriques ALS par type de maquettes.

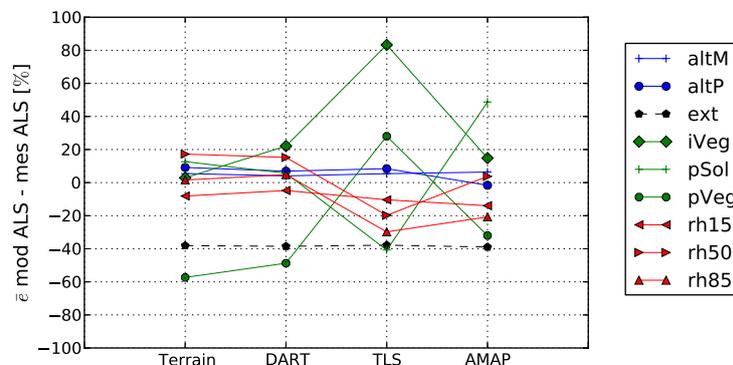


FIGURE 21 – Erreurs moyennes (sur toutes les placettes) des métriques par type de maquette, des waveforms simulées cumulées petites empreinte (mesurées - simulées), exprimée en pourcentage des métriques issues des mesures ALS

Globalement, les simulations ALS sont proches des mesures, avec de bons coefficients de corrélation (> 0.86), en moyenne meilleurs avec les maquettes "TLS", "Terrain" et "hybride" (à quasi égalité), et enfin les maquettes "AMAP".

Comme le montre la figure 21, les erreurs des métriques sont inférieures à 20%, sauf pour les métriques "pVeg" (sous-estimées dans les maquettes Terrain, hybride et AMAP, et surestimées pour les maquettes TLS), "iVeg" (TLS : surestimation), et "pSol" (TLS : sous-estimation, AMAP : surestimation). Ici, l'effet de "ringing" joue un rôle assez important, puisqu'il augmente artificiellement la part de la waveform qui "provient du sol". Il élargit aussi les waveform ALS, ce qui provoque une sous estimation de la métrique "ext" dans les simulations.

Mais, d'après les études précédentes et la visualisation des formes d'ondes (figure 20) on peut en effet penser que les maquettes "Terrain" et "hybride" sous-estiment le LAI et les maquettes TLS le surestiment. De plus, la sous-estimation des facteurs rh dans les maquettes TLS montre la tendance à surestimer la densité du haut du couvert par la méthode de voxélisation de données TLS qui a servi à créer les maquettes.

Malgré tout, la répartition verticale du feuillage semble assez cohérente dans la grande majorité des cas. Il serait donc possible, *a posteriori* d'ajuster les maquettes en terme de LAI global et de réflectances, pour obtenir un signal encore plus proche de la mesure, mais ce n'était pas l'objectif ici (l'objectif étant de valider les approches de modélisation).

Ainsi, à l'échelle d'une mesure lidar spatiale plusieurs approches sont possibles pour modéliser une placette forestière. Chaque représentation permet d'obtenir des simulations fiables, sous réserve qu'ils soient bien paramétrés. Or, la complexité de la paramétrisation dépend de la qualité et du type de mesures terrain disponibles.

2. ringing : apparition d'un petit pic à la suite d'un grand pic, dû à la chaîne de traitement embarquée dans le lidar

3.2 Comparaison des WF large empreinte : ALS simulées cumulées vs Spatial simulées

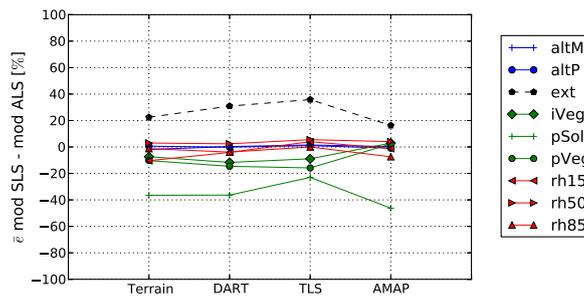


FIGURE 22 – Erreurs moyennes (sur toutes les placettes) des métriques par type de maquette, des waveforms simulées large empreinte par rapport aux waveforms simulées petite empreinte (ALS) cumulées (exprimées en pourcentage des métriques ALS simulées cumulées)

La comparaison des WF large empreinte (spatial) avec les WF petite empreinte (ALS) cumulées, montre une bonne concordance. Les erreurs moyennes (figures 22) par type de maquette sont inférieures à 20 %, sauf pour les métriques ext et pSol. Ceci s'explique par les diffusions multiples, qui sont bien plus importantes dans les WF large empreinte, que dans chacune des WF petite empreinte avant agrégation. On pourrait améliorer l'algorithme d'agrégation de waveforms petite empreinte pour prendre en compte les diffusions multiples, mais ce n'est pas non plus l'objet de la présente étude.

Cela signifie donc que ces représentations de la végétation sont valables aussi bien pour la simulation de lidar petite empreinte (agrégées à l'échelle d'une placette forestière), que pour la simulation d'un signal large empreinte. Cela renforce donc la confiance que l'on peut accorder au modèle.

4 Etude de sensibilité à la représentation de la végétation

4.1 Sensibilité au LAI

On fait ici varier le LAI total de la scène simulée en appliquant un facteur à la densité de chaque voxel pour chaque placette et deux types de maquettes qui utilisent des voxels tubides (TLS et hybride). La figure 64 montre les formes d'ondes, métriques et CC obtenus, pour les deux types de maquettes et chacune des placettes (de haut en bas). La figure 23 montre la tendance des métriques Lidar en fonction du LAI, exprimées en pourcentage de variation, calculées en moyenne sur toutes les placettes et les deux types de maquettes.

On peut y voir que :

- les tendances sont similaires entre les deux types de maquettes, bien que les métriques "rh" soient légèrement plus sensibles dans les maquettes "sucette". Il y a une plus grande variabilité dans les métriques hybrides
- les métriques iVeg, pSol et pVeg sont fortement corrélés avec le LAI (corrélation positive pour iVeg et pVeg et négative pour pSol).
- la métrique "rh15" est la plus sensible à la valeur globale de LAI (corrélation positive), les autres "rh" étant certainement plus corrélés à la distribution verticale du LAI dans le houppier
- le signal reçu augmente de -10% à +10%.
- Les différences proviennent de la distribution relative du LAI dans les deux types de maquette : une multiplication par deux du LAI dans une maquette où tous le matériel végétal est concentré, n'est pas exactement équivalent dans une maquette où le LAI est homogène.

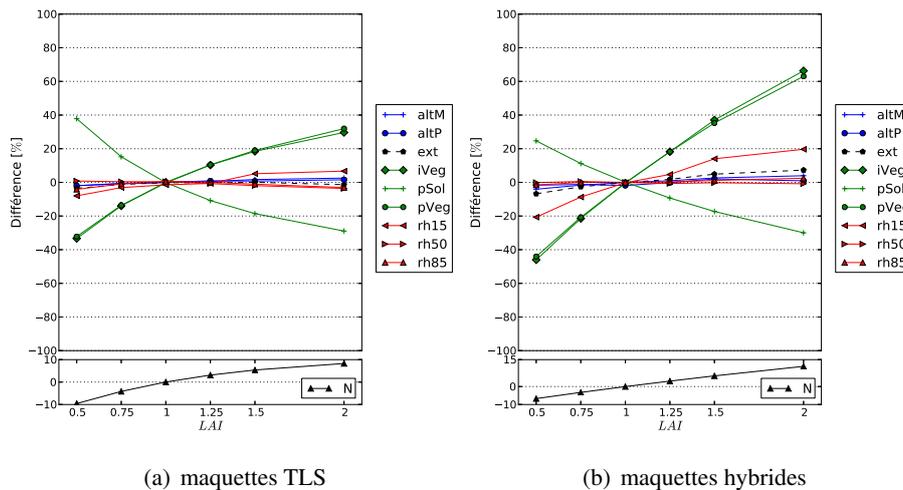


FIGURE 23 – Tendances des métriques en fonction du LAI total de la scène : différences entre les métriques calculées sur les WF obtenues en faisant varier le LAI, et les WF obtenues avec la simulation de référence, exprimées en pourcentage.

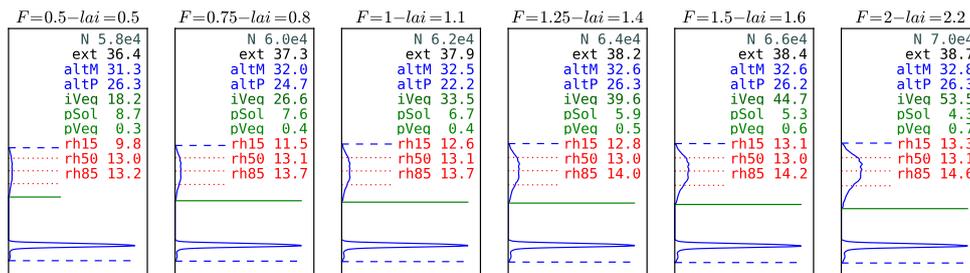


FIGURE 24 – Waveforms en fonction du LAI (placette 14, maquette hybride)

4.2 Sensibilité à la réflectance du sol

On fait ici varier le facteur ($F(\rho_{sol})$) de réflectance du sol d'un facteur allant de 0.1 à 2. Ce facteur est appliqué à la valeur initiale : 0.55, pour deux types de maquettes (TLS et hybride). On a donc des réflectances de sol simulées entre 0.05 et 1. Les différences avec la simulation de référence sont affichées dans la figure 27, les waveforms sont en annexe (figure 66 page 69).

Ici aussi on observe que les tendances sont similaires entre les différents types de maquettes (y compris de type "AMAP"). L'augmentation de la réflectance du sol entraîne logiquement une baisse des iVeg et pVeg, une augmentation de pSol et une augmentation du signal : un doublement de la réflectance du sol ($F(\rho_{sol}) = 2, \rho_s = \tau_f = 1$) entraîne une diminution de 40% de iVeg et pVeg, augmentation de 20% de pSol et une augmentation de 80% du signal reçu. Le signal n'augmente que de 60 % pour les maquettes TLS à cause d'un plus fort LAI. Les métriques rh85 et rh50 sont peu corrélés à la réflectance du sol, mais rh15 est aussi corrélé négativement avec la réflectance du sol (rh85 : -19% @ F = 2).

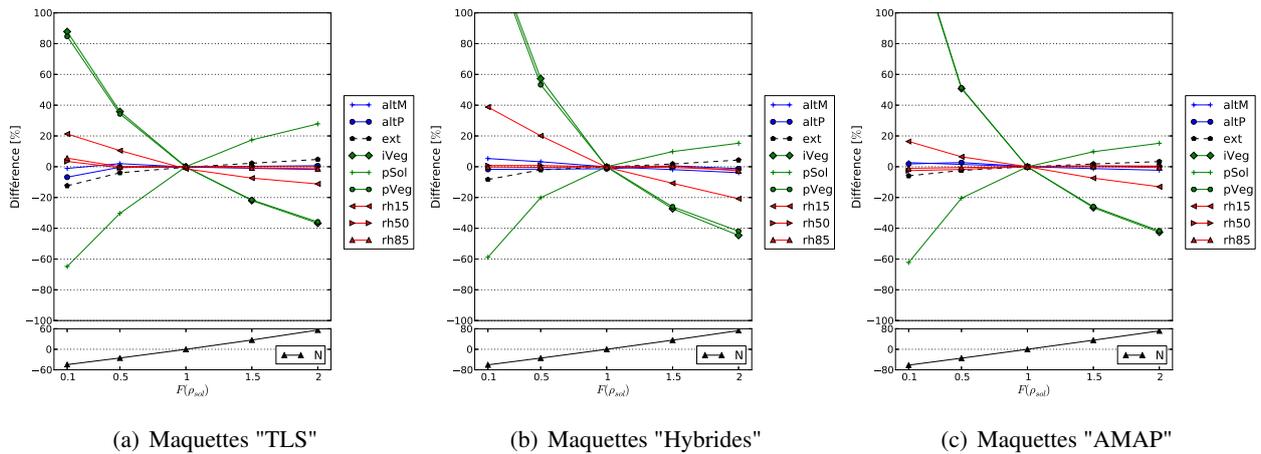


FIGURE 25 – Tendances des métriques en fonction de la réflectance du sol

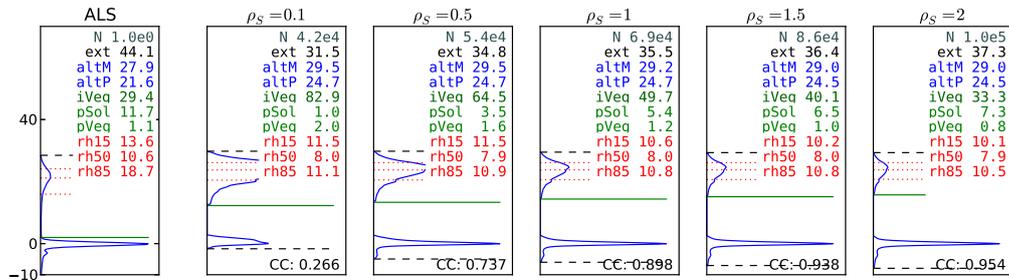


FIGURE 26 – Waveforms en fonction de la réflectance du sol (placette 14, maquette "TLS")

4.3 Sensibilité à la réflectance de la végétation

On applique un facteur (de 0.1 à 1.75) aux propriétés optiques de la végétation (reflectance et transmittance). Ce facteur est appliqué aux valeurs initiales de réflectance et transmittance (respectivement : 0.57 et 0.42). Les différences avec la simulation de références sont montrés par la figure 27, les waveforms sont en annexe (figure 66 page 69).

Entre les maquettes où le feuillage est représenté par de la matière turbide (maquettes "TLS" et "Hybride") et celles où la végétation est représentée par des triangles (maquette "AMAP"), on observe un comportement des métriques similaire mais avec une sensibilité plus grande pour les simulations "turbide". L'augmentation de la réflectance entraîne plus de diffusions multiples et donc une légère extension de la waveform. La partie de la WF liée à la végétation augmente (pVeg, iVeg, et les rh augmentent, et pSol diminue). Le signal augmente (+60% @F = 1.75).

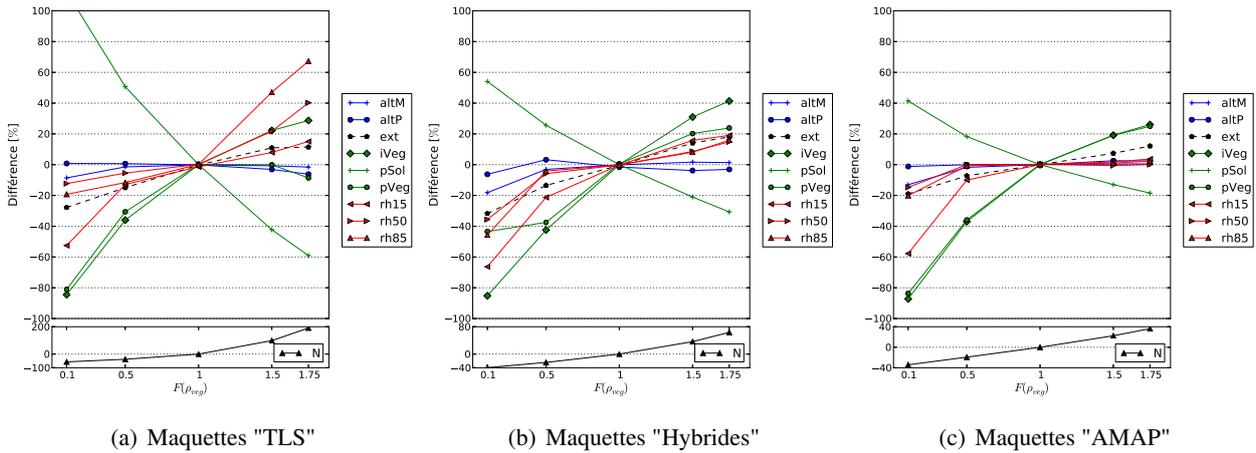


FIGURE 27 – Tendances des métriques en fonction de la réflectance de la végétation.

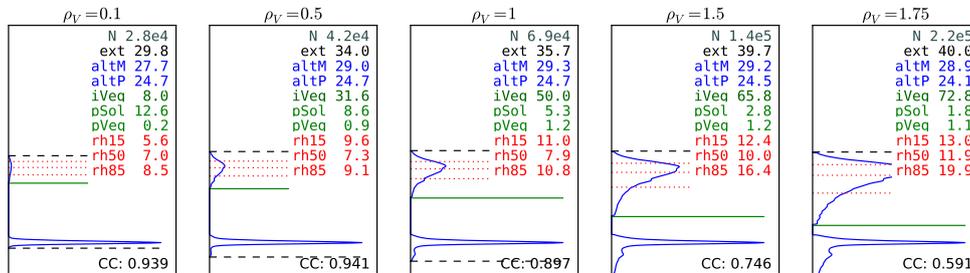


FIGURE 28 – Waveforms en fonction de la réflectance de la végétation (placette 14, maquette "TLS")

4.4 Sensibilité à la pente

Ici, on remplace le MNT du sol par un MNT plat (sans rugosité) dont on fait varier la pente entre 0 et 30°. Les waveforms obtenues sur les simulations "hybride" sont sur la figure 30 (page 34), et les tendances calculées sur toutes les placettes sur la figure 29. la pente des maquettes TLS ne pouvant pas être modifiée, on utilise les maquettes Hybride.

En l'absence de pente et de rugosité du sol (pente = 0°), seul le pic du sol augmente (+12 %). Lorsque la pente augmente le signal diminue légèrement (-8% @ 30°), le pic du sol diminue (-85% @ 30°), la waveform s'allonge (ext +40% @ 30°), l'extension de la waveform augmente et les rh diminuent, particulièrement le rh85 (-45% @ 30°). altM et altP augmentent du fait que le bas de la pente est considéré comme la hauteur "0", et donc les arbres en haut de la pente font "monter" le signal.

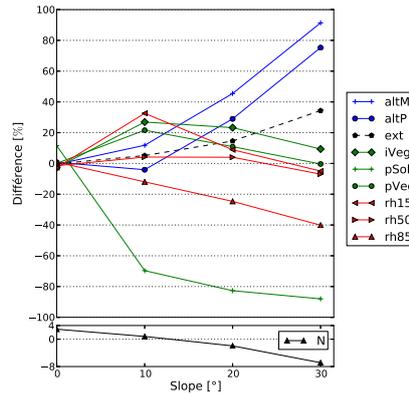


FIGURE 29 – Tendances des métriques en fonction de la pente de la maquette, avec un sol plat

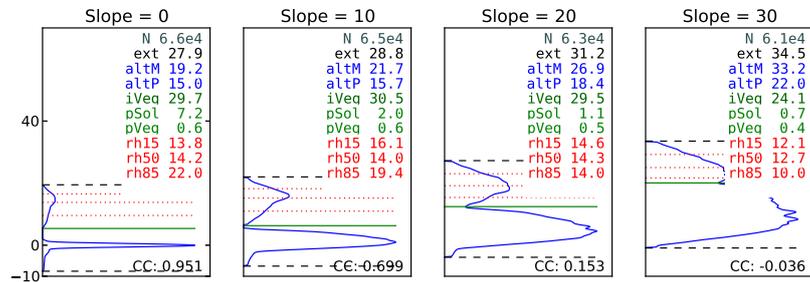


FIGURE 30 – Waveforms simulées avec différentes pentes, pour la placette 14, maquettes "Hybrides"

4.5 Maquettes "Hybrides" : Sensibilité à la présence de végétation sur le sol

On fait varier ici le LAI (de 0 à 4) de la couche herbacée uniquement (*i.e.* entre 0 et 2.5m au-dessus du sol, figure 31). On observe une augmentation du signal (+20 % @ $LAI_{herbe} : 0 \rightarrow 4$) et une augmentation de la part du signal provenant du "sol" (@ $LAI_{herbe} : 0 \rightarrow 4$: $iVeg=-20\%$ équivaut à $iSol +20\%$). Le pic du sol et de la végétation diminuent (-20%). L'écart est important pour un LAI entre 0 et 2, puis l'augmentation du LAI de la couche herbacée n'entraîne plus de changement.

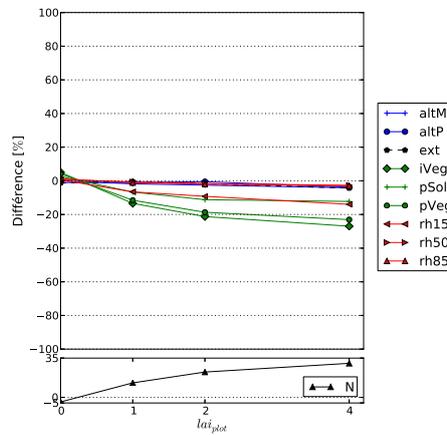


FIGURE 31 – Tendances des métriques en fonction de la densité de la couche herbacée, par rapport à la simulation de référence

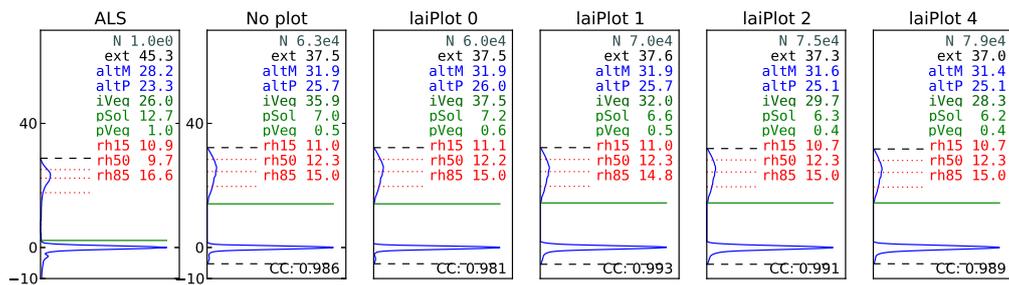


FIGURE 32 – Sensibilité à la présence de végétation sur le sol des maquettes, (placette 17, maquette Hybride)

4.6 Maquettes "sucettes" : Sensibilité à la distribution du LAI

Dans cette partie de l'analyse de sensibilité, on s'intéresse aux paramètres spécifiquement liés au type de maquette "sucette" (dimensions des houppiers et profil de LAI dans le houppier).

Sensibilité à la taille des houppiers

On applique ici un facteur sur les dimensions de houppier (extension horizontale et verticale) mais sans changer la hauteur totale des arbres. La figure 33 montre les waveforms obtenues sur la placette 1, et la figure 34 montre les différences par rapport à la simulation de référence, calculées en moyenne sur toutes les placettes.

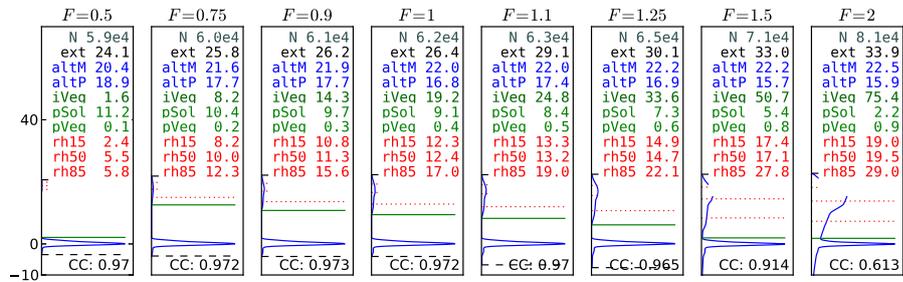


FIGURE 33 – Sensibilité à la taille des houppiers simulés, pour des arbres ellipsoïdaux (placette 1, maquette Hybride).

La taille des houppiers a un impact fort sur la plupart des métriques. Une erreur de 25% d'estimation de la taille ($F = 1.25$) entraîne une augmentation de plus de 50% de pVeg et iVeg (et une diminution symétrique de 50% de pSol). Les métriques rh augmentent de 20% environ, et le signal s'allonge de par les diffusions multiples.

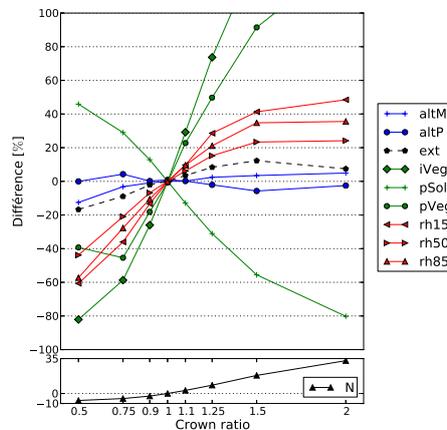


FIGURE 34 – Tendances des métriques en fonction de la taille des houppiers (ratio sur le rayon et l'épaisseur des couronnes), pour les maquettes "sucette"

Sensibilité au profil de LAI dans le houppier

Dans cette expérience, on compare différents profils de végétation dans les couronnes des arbres. En effet, il est possible de définir des profils verticaux à l'intérieur des couronnes dans DART. On a donc comparé le cas initial (avec profil vertical de LAI et horizontal de trous par couche, voir page 1) avec

- 1) le cas sans profil, ni horizontal ni vertical. Le houppier est alors complètement homogène.
- 2) le cas d'un profil vertical de LAI sans trous. On utilise alors la distribution verticale de référence (3 couches qui décrivent chacune 33% de la hauteur du houppier et représentent 10, 55, et 35% du LAI de l'arbre).

3) le cas d'un profil vertical différent (mais toujours sans trous), calculé à partir de la voxélisation TLS d'un arbre : 4 couches qui décrivent 25% de la hauteur, et respectivement (de bas en haut) de 8.23, 36.33, 44.19 et 11.25% du LAI de l'arbre)

Les waveforms simulées sont en annexe (page 74), et les tendances calculées sur toutes les placettes avec les maquettes "hybride" sont sur la figure 35.

- Sans aucun profil (cas 1) les rh15, rh50 augmentent de respectivement 15 et 38% (i.e. étalement de la partier végétation) tandis que altP diminue légèrement (-5%). iVeg et pVeg augmentent fortement (+100%) et pSol diminue de 60%. Le signal est plus grand.
- Lorsqu'on a un profil vertical, mais sans trous dans les houppiers (cas 2), les métriques suivent le même schéma, mais avec moins de sensibilité (pVeg et iVeg n'augmentent que de 50 et 70% et rh similaires au cas1)
- Dans le dernier cas, on obtient des résultats très similaires au cas de référence, avec des variations de métriques inférieures à 15%.

Ainsi, le profil de LAi des arbres individuels à un impact non négligeable sur le signal. Pour la simulation, il est donc important de correctement estimer ce profil par espèce d'arbre. Il est aussi préférable d'estimer ce profil par des valeurs approximatives tiré de l'observation terrain ou de mesures TLS, plutôt que de considérer le houppier parfaitement homogène.

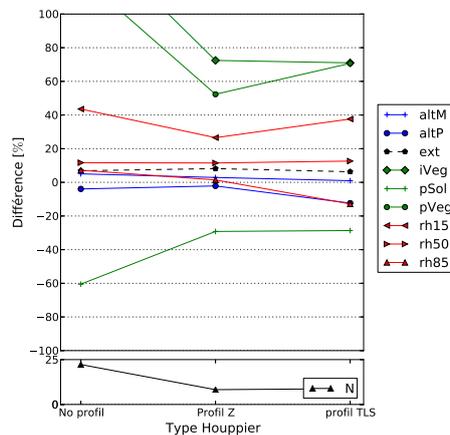


FIGURE 35 – Tendances des métriques en fonction de distribution du matériel dans le houppier. A gauche : tendance par rapport à la simulation de base ; à droite : tendance par rapport aux mesures ALS cumulées

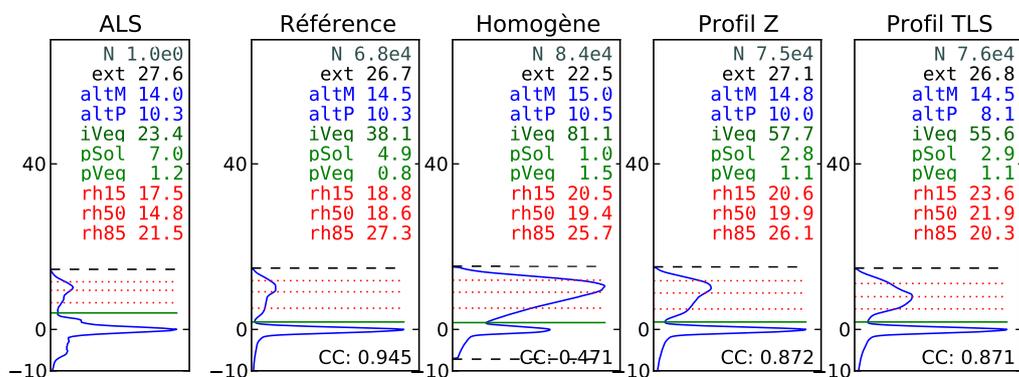


FIGURE 36 – Sensibilité à la distribution du LAI dans le houppier, pour chacune des placettes (placette 18, maquette Hybride)

4.7 Maquettes "TLS" : Sensibilité à la distribution du LAI

La distribution 3D de la végétation est donnée par la distribution des voxels (présence/absence de végétation), mais aussi par la distribution relative des densités des voxels. Cette expérience vise à quantifier l'impact de la distribution 3D relative du LAI. On a donc comparé la simulation de référence avec 1) le cas où l'on supprime les voxels qui ont la plus forte densité, et 2) le cas où on fixe la densité des voxels à la densité moyenne de la simulation de référence : ($\rho_{\text{voxel}} = \bar{\rho} = 0.54 \text{ m}^2/\text{m}^3$ pour la placette 1). Les WF simulées sont sur la figure 38, page 38). Les tendances sont sur la figure 37. La distribution relative de la densité des voxels a un impact assez limité : Pour le cas 1) les différences sont minimales. Pour le second cas, rh15 et rh50 augmentent de 15%, et iVeg et pVeg diminuent de -10%.

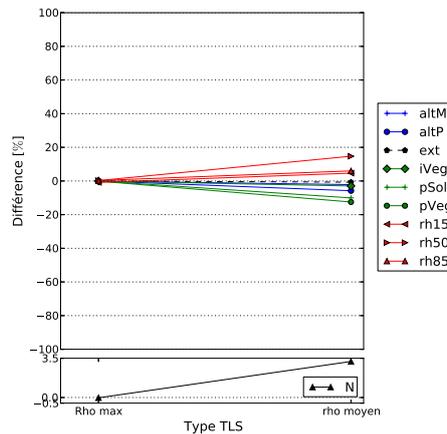


FIGURE 37 – Tendances des métriques en fonction de la répartition de la végétation dans les maquettes TLS.

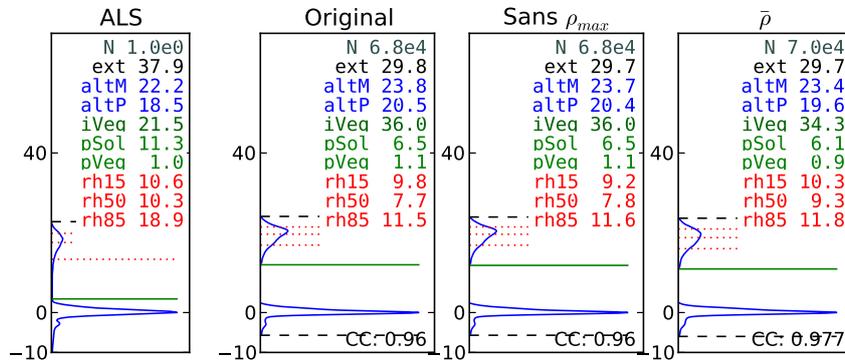


FIGURE 38 – Waveforms avec différents degrés de simplification du profil de LAI dans le houppier (placette 1, maquette Hybride)

4.8 Maquettes "AMAP" : Voxélisation des houppiers

On s'intéresse ici à la voxélisation des houppiers AMAP, c'est-à-dire la transformation des triangles qui forment le houppier en voxels turbides. la transformation a été testée à 4 résolutions (0.125, 0.25, 0.5 et 1m). La figure 39 montre les tendances calculées sur toutes les placettes.

Des différences apparaissent entre la scène "triangle" et la scène "turbide voxélisée" au niveau de l'énergie provenant de la végétation (pVeg et iVeg augmentant de 20 à 25%, pSol diminue de 12% à la résolution de 25 cm). L'énergie totale est supérieur de près de 9% avec la représentation turbide. La waveform s'allonge un peu du fait d'une légère sous-estimation des diffusions multiples avec la végétation "triangles" (ext, rh15, rh50 et rh85 augmentant de moins de 10%, ce qui est peu significatif). On observe aussi des différences entre les différentes résolutions utilisées pour voxéliser, seuls pVeg et iVeg augmentent de 10 et 20% (pour des tailles de

voxels entre 0.25 et 1 m), dû à un taux de couverture plus important avec de larges voxels. Les plus petits voxels ont les résultats les plus proches de la maquette "triangles". Le temps de calcul est sensiblement équivalent, mais l'espace mémoire utilisé est beaucoup plus important avec de petits voxels.

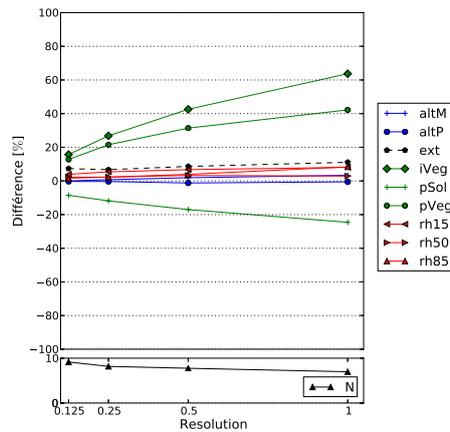


FIGURE 39 – Tendances des métriques en fonction de la résolution des voxels utilisée dans la voxélisation des maquettes "AMAP"

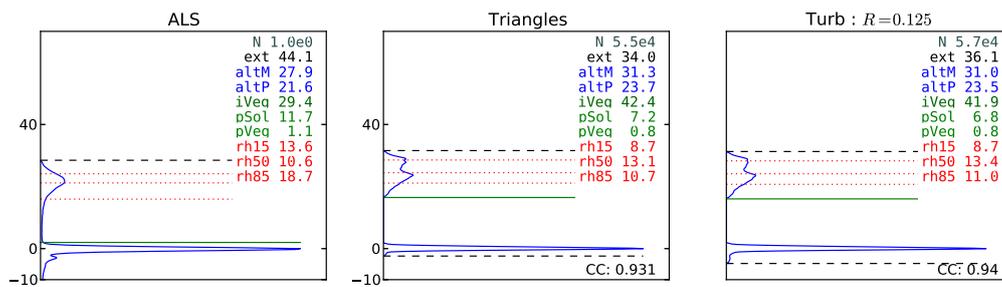


FIGURE 40 – Waveforms avec différentes résolution de maquette, où la végétation a été transformée en turbide (maquette AMAP, placette 14)

5 Etude de sensibilité aux paramètres capteur

5.1 Angle d'incidence

On fait varier l'angle d'observation du Lidar (entre 0 et 20°) sur chacune des placettes et les différents types de maquettes. La figure 41 montre les tendances calculées sur toutes les placettes, pour chaque type de maquette. A titre d'exemple la figure 42 montre les WF obtenues sur la placette 14, (maquette TLS).

On observe un impact similaire entre les différentes représentations. L'impact est fort pour un angle d'incidence supérieur à 10°. A $\theta = 20^\circ$, étalement de la waveform, diminution de 80% de pSol, et diminution du signal de 35%.

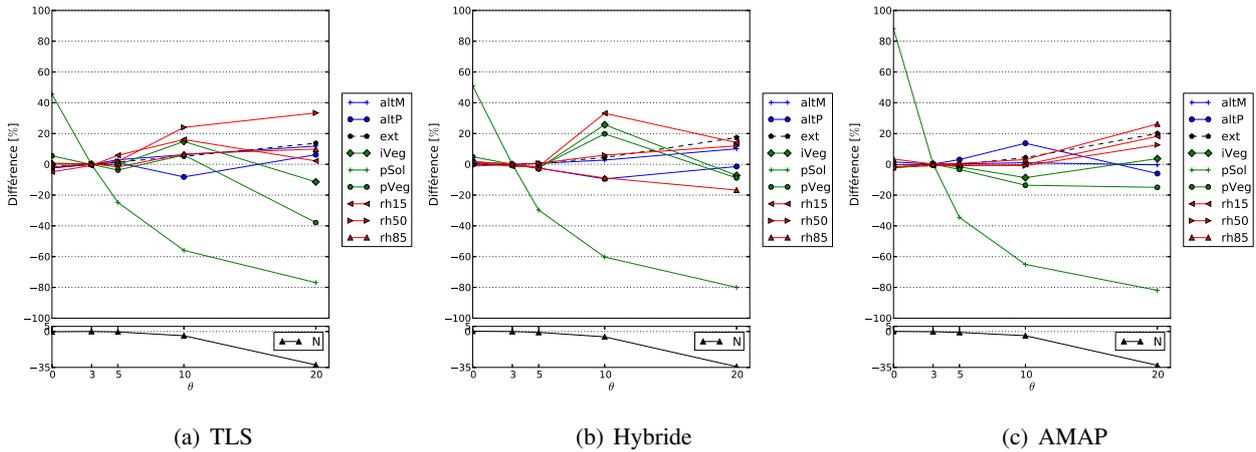


FIGURE 41 – Tendances des métriques en fonction de l'angle d'incidence du Lidar (maquettes TLS à gauche et hybrides à droite)

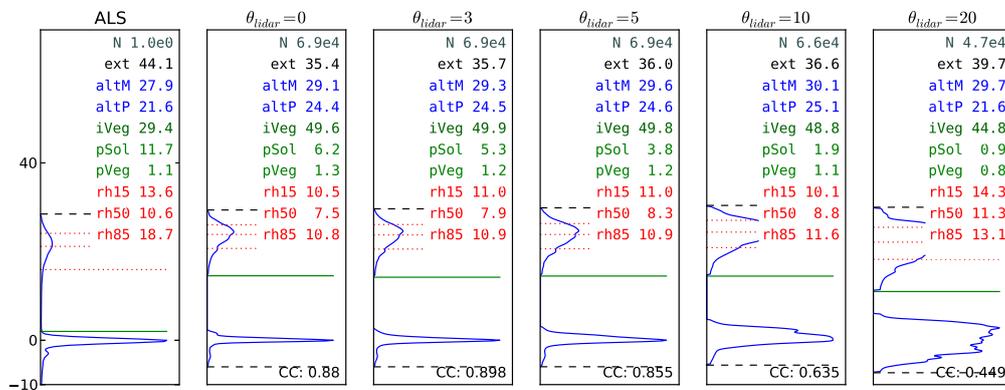


FIGURE 42 – Waveforms en fonction de l'angle d'incidence (θ) du faisceau (placette 14, maquette TLS)

5.2 Sensibilité au rayon du footprint

On fait ici varier le rayon du footprint entre 5 et 20m. En général, l'impact de la taille du footprint dépend du degré d'hétérogénéité du milieu et de la pente locale. Dans notre cas d'étude le peuplement est assez homogène et le dénivelé est faible, ce qui simplifie l'analyse.

Le niveau du signal est peu impacté par la taille du footprint. Par contre, l'intensité maximale du pic du sol (pSol) est négativement corrélée avec la taille du footprint (-60% @ $R_{FP} = 5$), probablement à cause de la plus grande hétérogénéité du sol avec un rayon plus grand (d'autant plus que le Lidar est à 3°). Le rh15 est positivement corrélé avec le rayon.

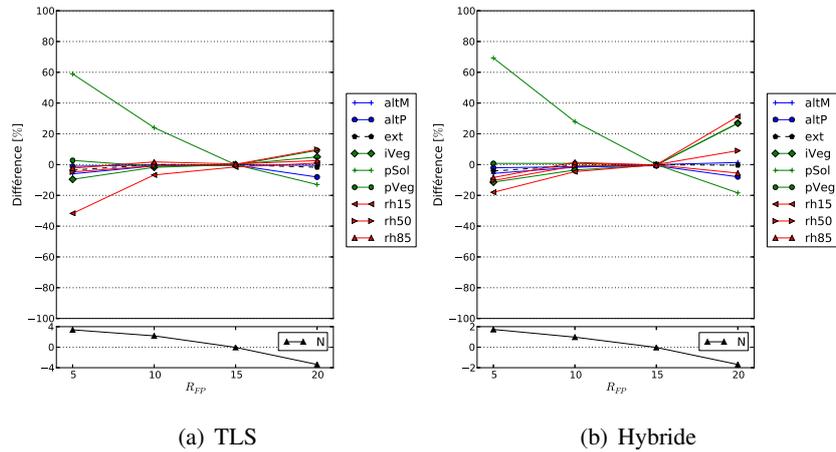


FIGURE 43 – Tendances des métriques en fonction du rayon du footprint (maquettes TLS à gauche et hybrides à droite)

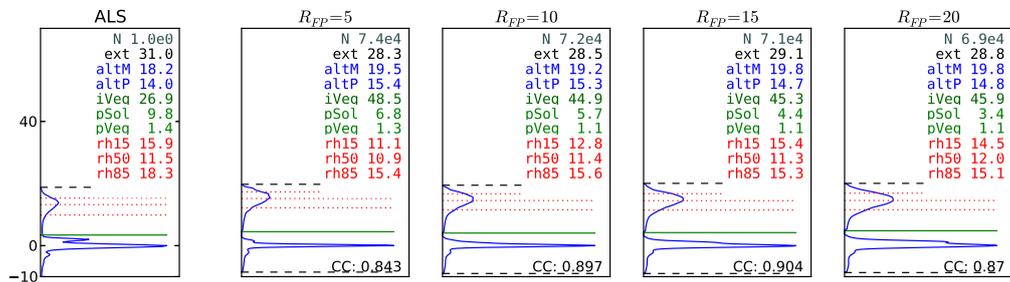


FIGURE 44 – Waveforms avec différentes pentes, pour chacune des placettes (placette 24, maquette TLS)

5.3 Sensibilité à la précision sur la position

La précision du positionnement du centre du footprint peut avoir un impact sur la mesure, en fonction de l'hétérogénéité du milieu. Afin d'illustrer ce phénomène dans le cas de la forêt des landes, on fait ici varier la position du centre en lui appliquant un décalage de $\pm 2.5\text{m}$ suivant X et Y. Les waveforms obtenues sont montrées en annexe (section 8.3). Les résultats pour la placette 14 (maquette TLS) est montré par la figure 46, et les tendances calculées sur toutes les placettes sur la figure 45.

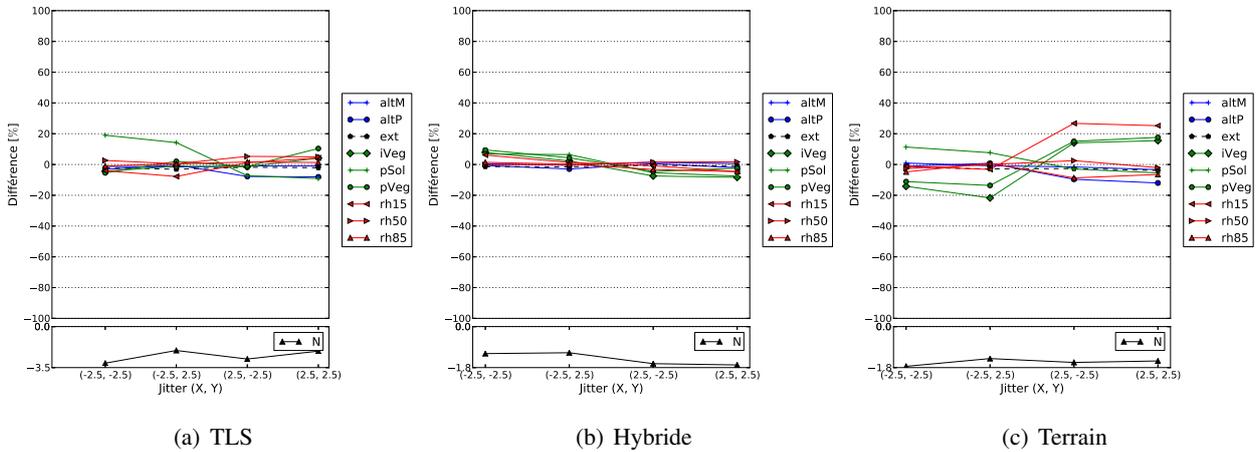


FIGURE 45 – Tendances des métriques en fonction de la position visée (jitter)

L'imprécision sur la position de la mesure a un impact limité dans ce type de milieu (environ 10% de différence), mais qui peut aller jusqu'à 20% pour le pic du sol.

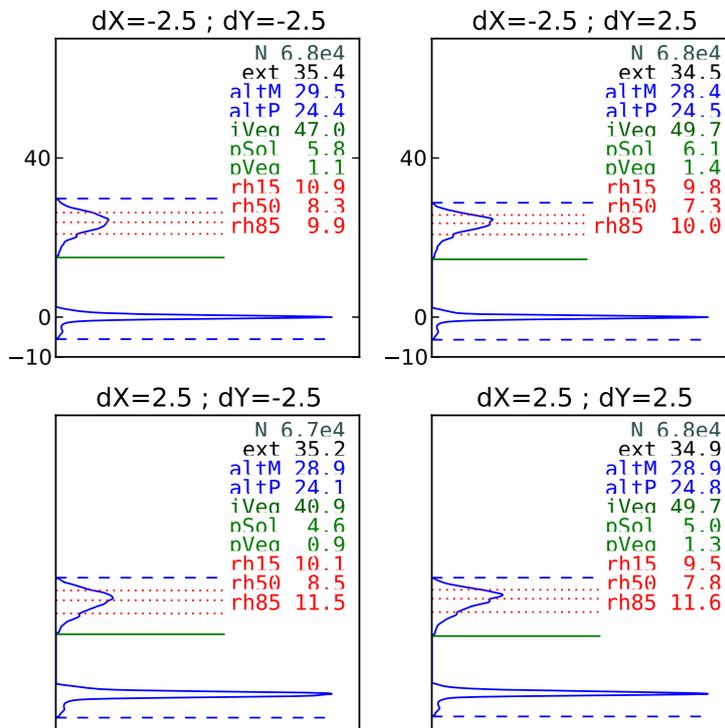


FIGURE 46 – Waveforms avec différentes pentes, pour chacune des placettes (placette 14, maquette TLS)

6 Tableau récapitulatif et conclusion

La figure 47 récapitule le niveau de sensibilité de chaque paramètre étudié, et montre le signe de la corrélation. On peut observer que :

1. Le niveau du signal (métrique N) est d'abord influencée par la réflectance de la végétation et du sol (*i.e.* la longueur d'onde)
2. l'intensité du signal provenant de la végétation (iVeg) dépend du LAI, de la réflectance du sol et de la végétation, des profils de végétation dans les houppiers.
3. la valeur maximale du pic du sol (pSol) est fortement corrélé à la réflectance de la végétation (corrélation négative), puis à l'angle de visée, à la pente, à la taille de l'empreinte au sol et au LAI.
4. les métriques de hauteur (altM et altP) dépendent essentiellement de la pente et un peu de l'angle de visée
5. les percentiles de hauteur sont d'abord sensibles à la réflectance de la végétation (pour un type de peuplement donné). Quand la réflectance augmente, les retours sont davantage vers le haut du couvert. Mais il est très probable que ces percentiles soient en fait beaucoup plus sensibles au type de peuplement, dans la mesure où chaque type de peuplement a une distribution verticale des feuilles propre.

L'étude a permis de

1. valider la simulation de scènes forestières pour simuler du Lidar à l'échelle d'une placette
2. valider la simulation du Lidar ALS
3. comparer des mesures ALS (petite empreinte) agrégées à des mesures spatiales (large empreinte)
4. quantifier l'impact des principales caractéristiques du couvert et de l'acquisition Lidar sur les métriques

La section suivante reproduit ce type d'analyse de sensibilité sur d'autres types de couvert afin de tester la validité des résultats obtenus sur ce site.

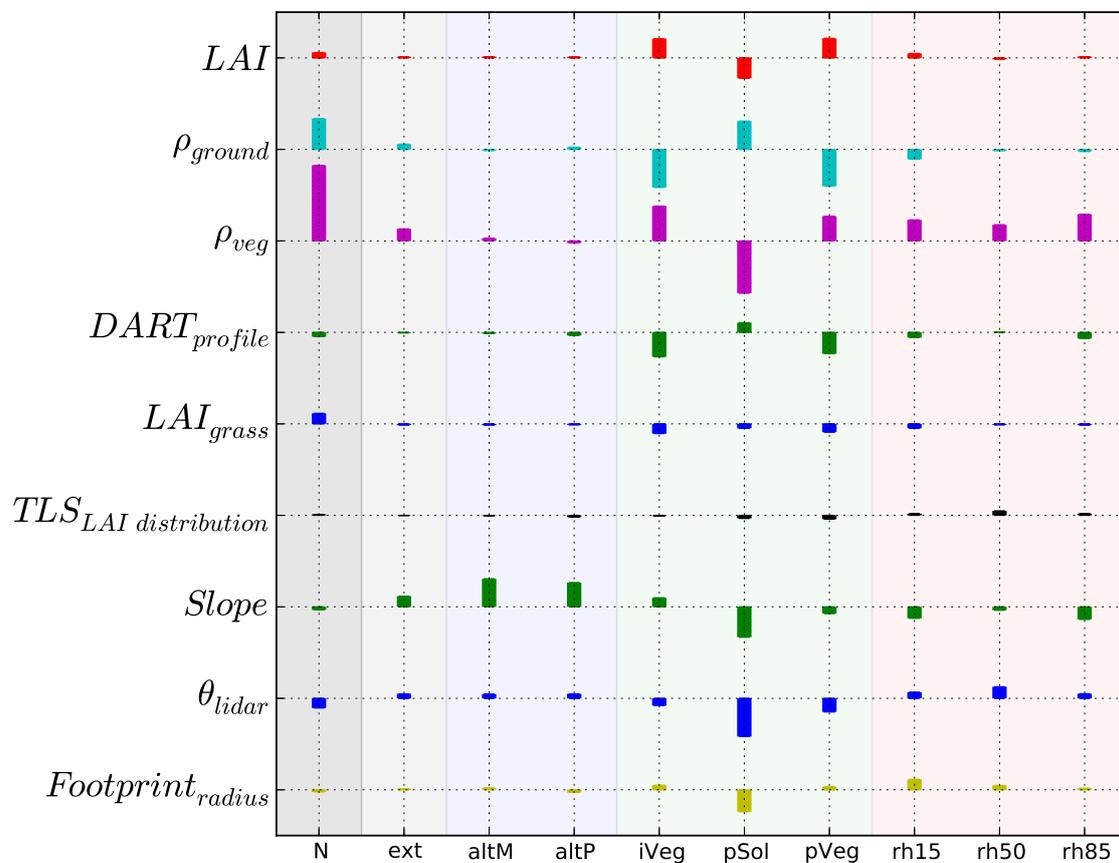


FIGURE 47 – Sensibilité globale de chaque paramètre sur chaque métrique Lidar, calculées avec les maquettes TLS sur toutes les placettes du site des Landes

VI Site de La Réunion (forêts tropicales)

1 Données

4 placettes ont été mesurées lors de la campagne de mai 2013 : Marelongue 150m, Marelongue 300m, Cryptomérias, Tamarrins. Leur position sur l'île est montré sur la figure 48.

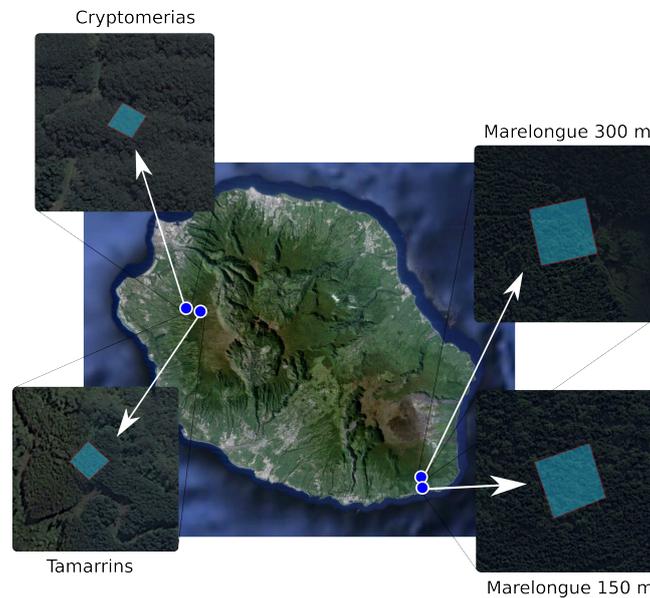


FIGURE 48 – Position des placettes sur image satellite (google)

1.1 Mesures terrains

Le protocole mis en place pour chaque placette est le suivant :

1. pose d'un point de repère sur un endroit dégagé au plus proche de la placette, pour enregistrement GPS de la position pendant quelques heures (pour une meilleure précision)
2. repérage et marquage à la rubalise des coins de la placette
3. numérotation de chaque arbre de plus de 7 cm de dbh, à l'aide d'une étiquette en métal gravée du numéro de l'arbre, placée sur une fil de pêche qui encercle la base du tronc.
4. création d'un "cheminement" au tachéomètre permettant de géoréférencer la placette à partir du point GPS
5. mesure au tachéomètre de la position de chaque arbre (à la hauteur de 1.4 m au-dessus du sol), et de la position des coins de la placette
6. en parallèle, mesure de l'espèce, de la hauteur et du dbh de chaque arbre numéroté
7. Mesures TLS : un plan de scan est grossièrement établi pour couvrir toute la placette, puis affiné au cours de l'expérience. Puis, pour chaque scan :
 - (a) positionnement du TLS vers un coin où la visibilité est optimale
 - (b) vérification de la fenêtre de mesures (angles min/max du scanner)
 - (c) pose de cibles pour correspondance du scan avec le scan suivant
 - (d) scan horizontal, et scan vertical (l'instrument Riegl ne permettant pas un scan à 360°)

Les mesures comportent donc des relevés de hauteur et position au tachéomètre (sauf pour la placette de MareLongue à 300m), l'essence de chaque arbre de plus de 7 cm de dbH (chaque arbre est numéroté). Pour chaque placette, de nombreuses acquisitions TLS ont été effectués de manière à avoir très peu d'occlusion sous la canopée (l'occlusion intra-canopée ne pouvant être totalement éliminée). Les placettes font environ 40 m de côté.

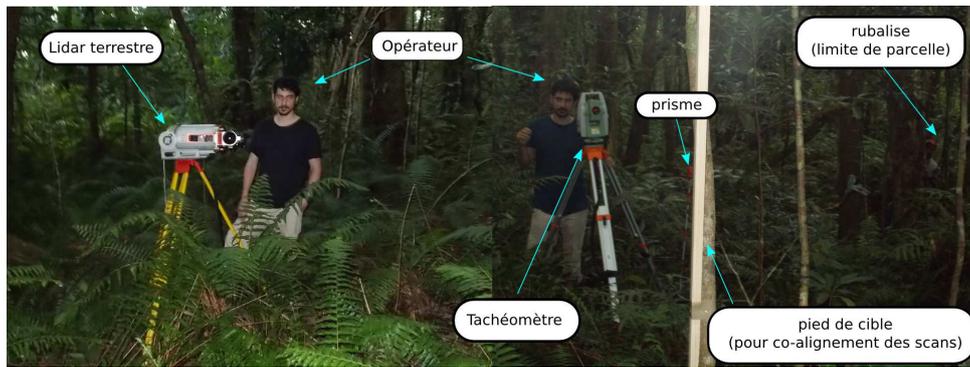


FIGURE 49 – Photo illustrant les instrument utilisés pour les relevés terrain

A partir des relevés terrains, deux types de MNT ont été reconstitués sur chaque placette : un MNT créé à partir des mesures TLS voxelisées, et un MNT créé par interpolation des données acquises au tachéomètre (chaque arbre dont la position a été mesurée donne un point xyz - corrigé de la hauteur de la mesure). La comparaison des MNT ainsi créés (figure 50) montre que les deux approches sont quasi-équivalentes. On peut relever que les mesures TLS couvrent une plus grand zone, et semblent légèrement plus précises.

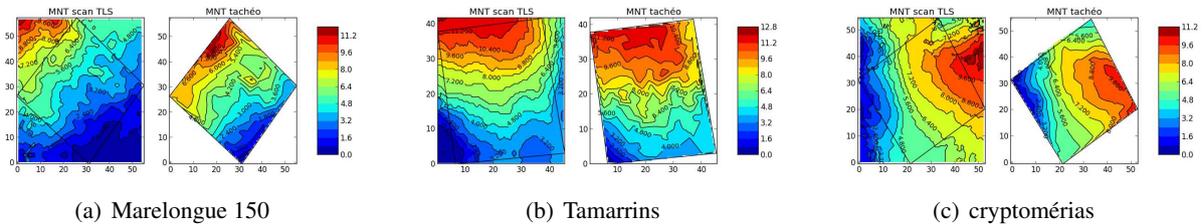
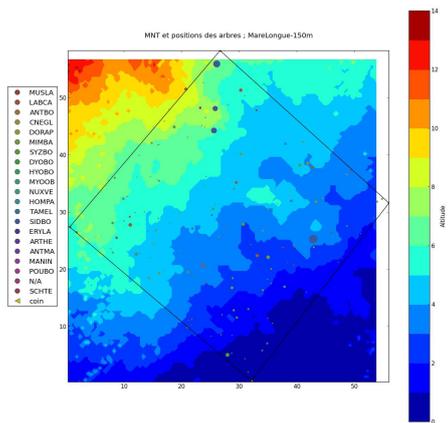


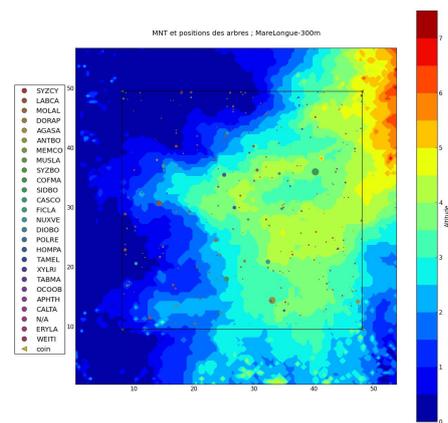
FIGURE 50 – MNT comparés, obtenus par voxelisation des données TLS (à gauche) et interpolation des données tachéomètre (à droite). (Pas de relevés au tachéomètre sur la placette de Marelongue-300m)

La figure 51 montre la position et l'espèce de chaque arbre mesuré sur le terrain. La taille des cercles indique le dbh des arbres mesurés. Chaque arbre a été numéroté et est référencé dans l'inventaire terrain.

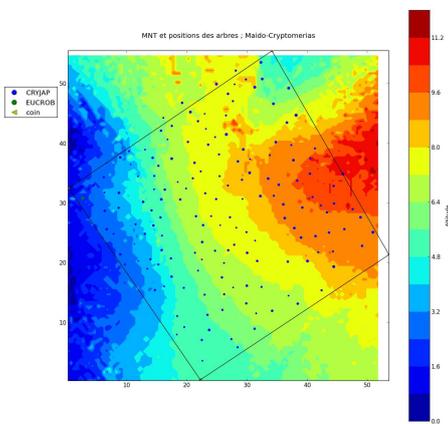
Seulement 2 types de maquettes ont été testées sur le site de La Réunion dans ce post-doc (pas de maquettes AMAP en forêt tropicale). Les maquettes "sucette" sont très peu calibrées (multitude d'espèce dont on ne connaît pas les relations allométriques, calibrées "à vue d'expert"), donc leur niveau de représentativité est incertain.



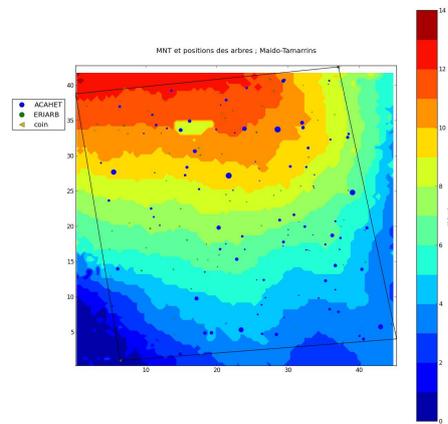
(a) MNT (TLS) + positions arbres



(b) MNT (TLS) + positions arbres



(c) MNT (TLS) + positions arbres



(d) MNT (TLS) + positions arbres

FIGURE 51 – MNT et espèce et position des arbres sur les 4 placettes. Le diamètre des cercles est égal au dbh des arbres mesurés. Le carré indique les limites de la parcelle où les arbres ont été mesurés.

1.2 Vols Lidar

Lors de la campagne, des vols Lidar ont été effectués par l'équipe de Patrick Chazette. Le Lidar utilisé est un Lidar UV (352 nm) initialement développé pour l'atmosphère. Les acquisitions ont été effectuées sur un ULM (stabilité en vol pas très bonne), avec une machine inertielle et un GPS pas très précis. La figure 52 montre les empreintes théoriques au sol sur 3 des placettes, compte tenu des données de géoréférencement fournies par les appareil de mesure (roulis, tangage, lacet + GPS), calculé avec une tache de 10 m de diamètre à 300 m d'altitude (empreinte théorique de l'instrument lors de la mesure).

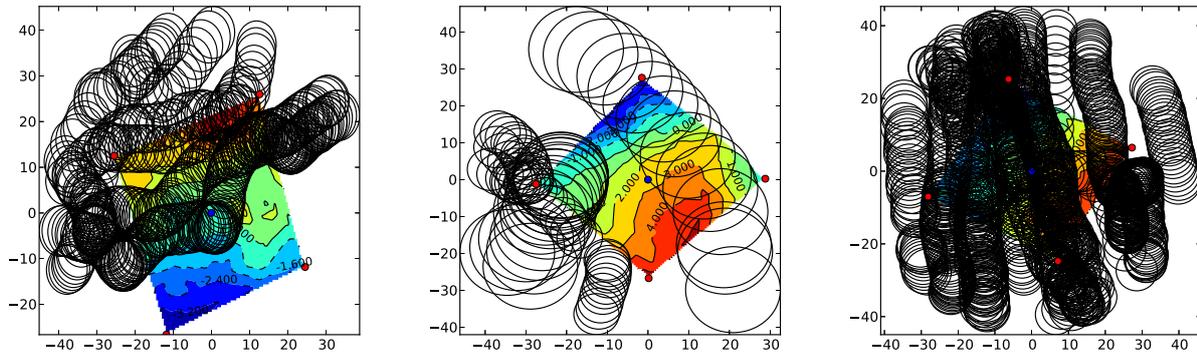


FIGURE 52 – MNT et empreintes au sol des tirs Lidar de la campagne "Réunion", sur 3 des placettes mesurées (de gauche à droite placette : Marelongue 150m, cryptoméris, et tamarrins)

La figure 53 montre les WF mesurées en 3D avec le MNT. On peut y voir clairement que les WF se trouvent "sous le MNT", avec à chaque passage de l'ULM une altitude différente des tirs, ce qui illustre la grande imprécision des données GPS. De plus, le Lidar n'étant pas optimisé pour l'observation de la forêt (le signal le plus fort provient de l'atmosphère, dans une zone proche de l'instrument), et le SNR du signal provenant de la canopée est assez mauvais. Il est donc très difficile (voire illusoire) d'utiliser ces WF pour les comparer avec les simulations, contrairement à l'étude du cas des Landes.

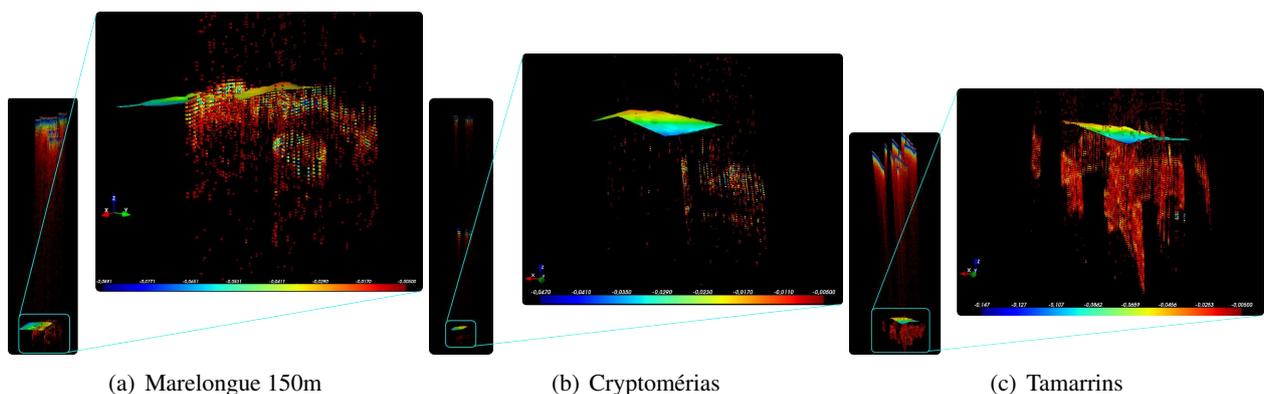


FIGURE 53 – Visualisation 3D des MNT et waveforms mesurées. A gauche, la waveform complete, à droite, un zoom autour du MNT

2 Simulation des Maquettes initiales

Les placettes ont des taux de couverture de 100%, et des LAI forts (de 2.55 à 7.13), surtout pour les placettes de Marelongue (de 3.8 à 6.9). La densité moyenne des voxels est proche de $0.8 \text{ m}^2/\text{m}^3$. La placette des tamarins est la moins dense, et où le dénivelé est le plus fort (14m). Les arbres de cette placette sont des *Acacia heterophylla* et *Erica arborescens*. Leur forme naturelle est assez tortueuse et géométriquement complexe, ce qui rend la représentation "arbre sucette" moins réaliste que dans les autres placettes.

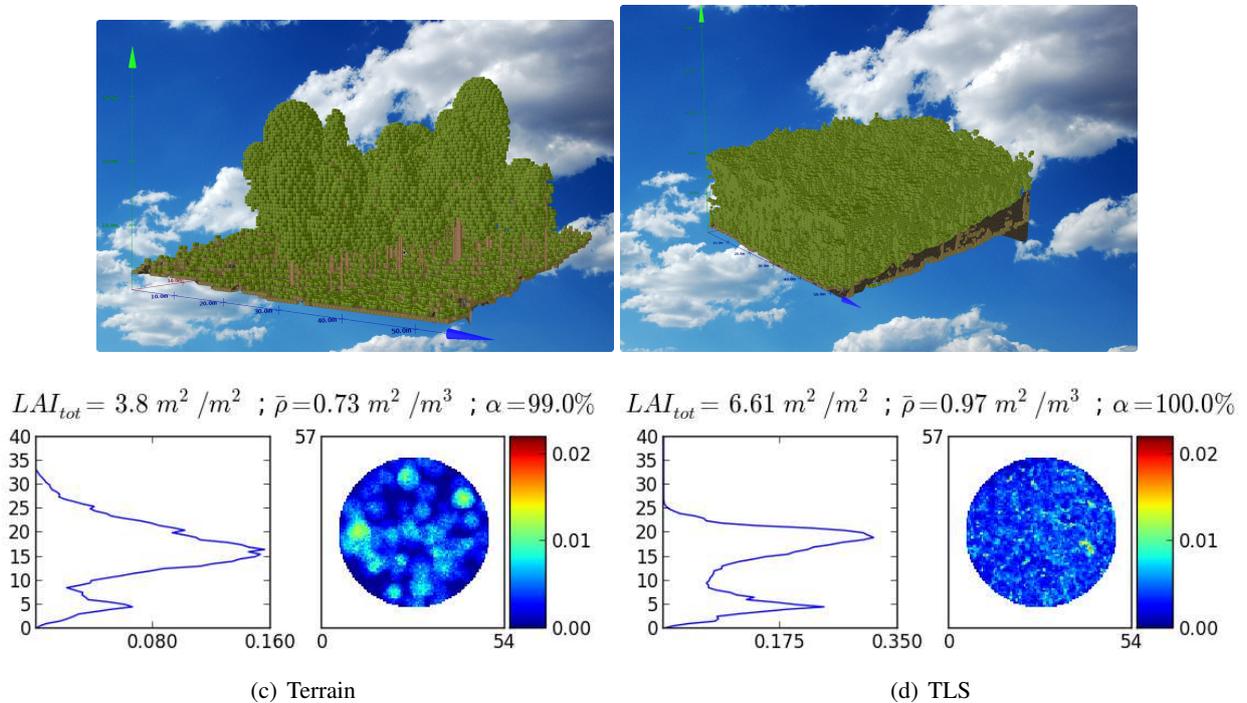


FIGURE 54 – Placette "Marelongue 150" : maquettes DART ("Terrain" à gauche, "TLS" à droite)

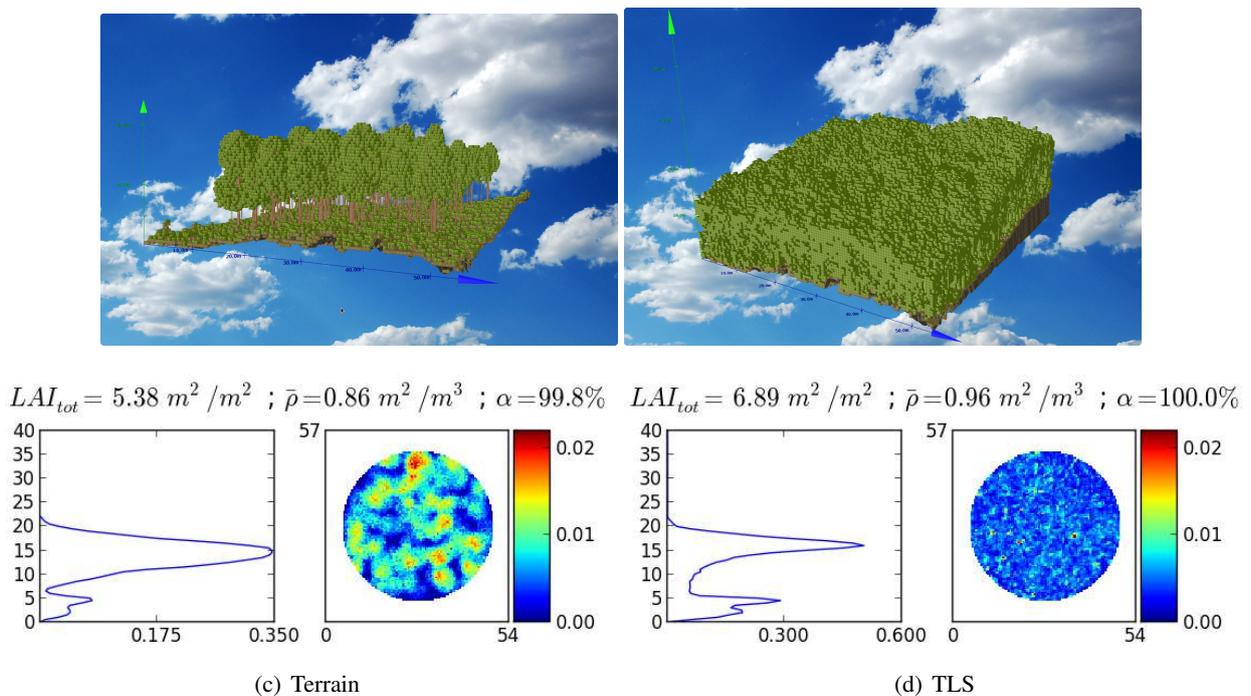
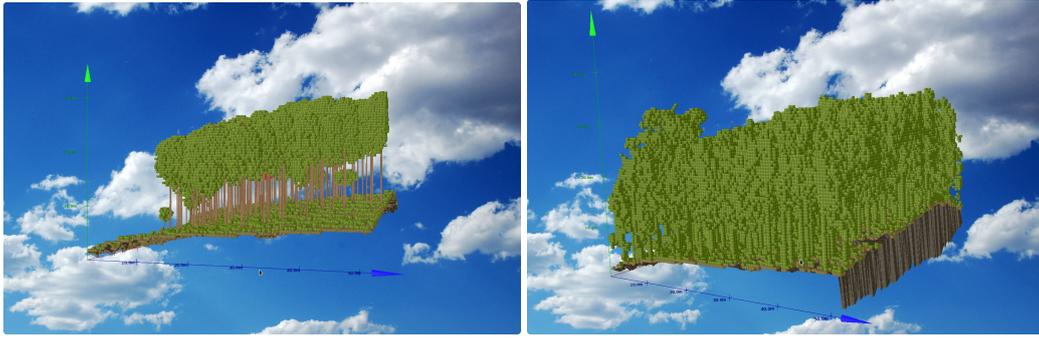
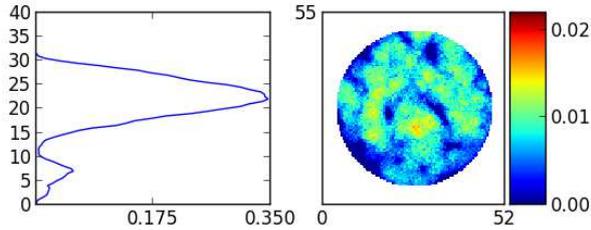


FIGURE 55 – Placette "Marelongue 300" : maquettes DART ("Terrain" à gauche, "TLS" à droite)

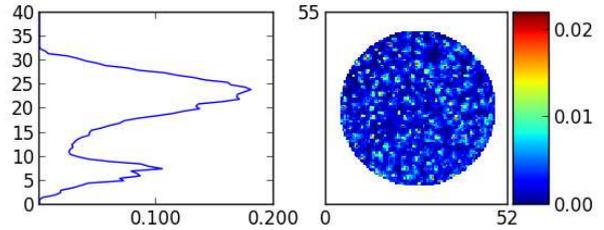


$LAI_{tot} = 7.13 \text{ m}^2 / \text{m}^2$; $\bar{\rho} = 0.94 \text{ m}^2 / \text{m}^3$; $\alpha = 99.9\%$



(c) Terrain

$LAI_{tot} = 4.79 \text{ m}^2 / \text{m}^2$; $\bar{\rho} = 1.02 \text{ m}^2 / \text{m}^3$; $\alpha = 97.6\%$

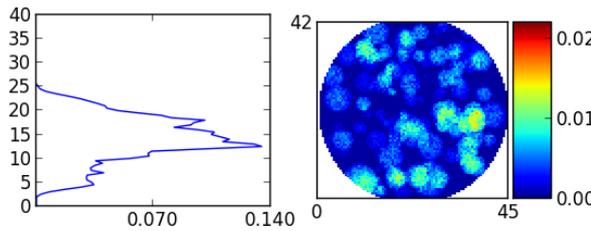


(d) TLS

FIGURE 56 – Placette "Cryptomérias" : maquettes DART ("Terrain" à gauche, "TLS" à droite)

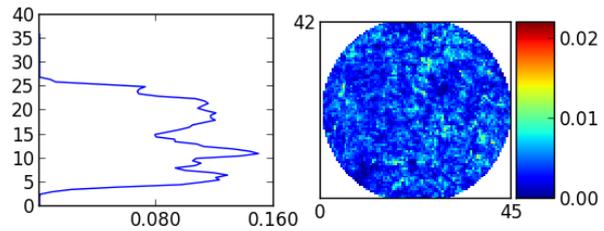


$LAI_{tot} = 2.55 \text{ m}^2 / \text{m}^2$; $\bar{\rho} = 0.88 \text{ m}^2 / \text{m}^3$; $\alpha = 100.0\%$



(c) Terrain

$LAI_{tot} = 4.59 \text{ m}^2 / \text{m}^2$; $\bar{\rho} = 0.79 \text{ m}^2 / \text{m}^3$; $\alpha = 100.0\%$



(d) TLS

FIGURE 57 – Placette "Tamarrins" : maquettes DART ("Terrain" à gauche, "TLS" à droite)

3 Simulation des WF

Les waveforms simulées montre un fort pic de la végétation et un faible pic du sol. La pente est relativement forte, notamment pour la placette des tamarrins (où les arbres ne sont pas très grands), ce qui implique un fort mélange de la part du sol et de la végétation, et donc une analyse par les métriques Lidar complexe. Comme on peut le voir sur la figure 58.c, l’algorithme qui permet de séparer la partie sol de la végétation ne semble pas très adapté à ce type de scène, car en effet le signal provenant du sol et de la végétation sont trop mélangés. Il pourrait être envisagé d’utiliser d’autres types de métriques Lidar pour ce type de configuration.

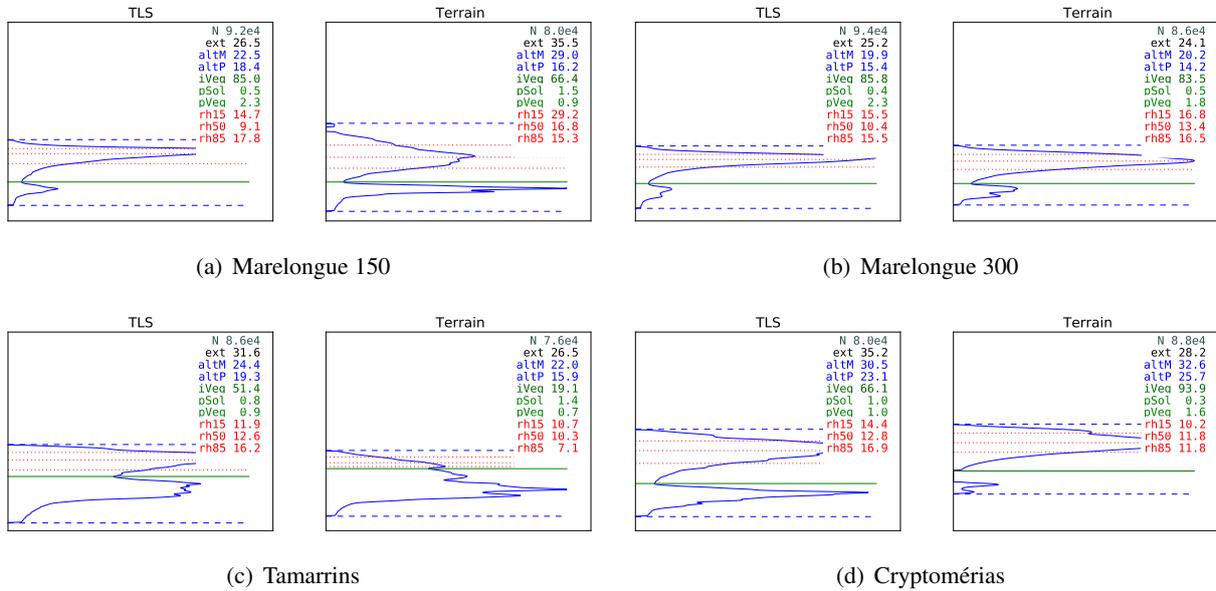


FIGURE 58 – Formes d’ondes simulées sur les 4 placettes, avec deux types de maquettes (TLS et Terrain)

4 Analyse de sensibilité

Tous les résultats analyse de sensibilité se trouvent en annexe (section 2, page 81). Ils montrent une sensibilité des métriques Lidar très proche du comportement observé pour les Landes. Cependant, les cas où le signal provenant de la végétation est très fortement mélangé au signal provenant du sol induisent un bruit relativement élevé pour le calcul des métriques.

La figure 59 récapitule le niveau de sensibilité de chaque paramètre étudié, et montre le signe de la corrélation. On peut aussi observer une plus grande sensibilité de la plupart des métriques à la réflectance de la végétation (comparé au cas des Landes), et symétriquement une plus faible sensibilité à la réflectance du sol.

Mais globalement la sensibilité des métriques est la même quel que soit le niveau de densité du peuplement, jusqu’à un certain point (où la densité est trop forte pour voir le sol, $LAI > 10$, ou bien la pente est trop forte, ou bien l’angle de visée est trop grand pour pouvoir correctement séparer le signal provenant du sol et de la végétation). La pente a un fort impact sur toutes les métriques. Le LAI de la couche herbacée a un impact faible. L’énergie enregistrée par le capteur dépend essentiellement du LAI. Les métriques altM et altP restent stables, et sont donc de bons indicateurs pour segmenter les types de peuplement, indépendamment de leur réflectance, valeur et distribution de LAI. Ces derniers paramètres ont un impact sur (*i.e.* peuvent être mesurés par) les métriques iVeg, pVeg et pSol.

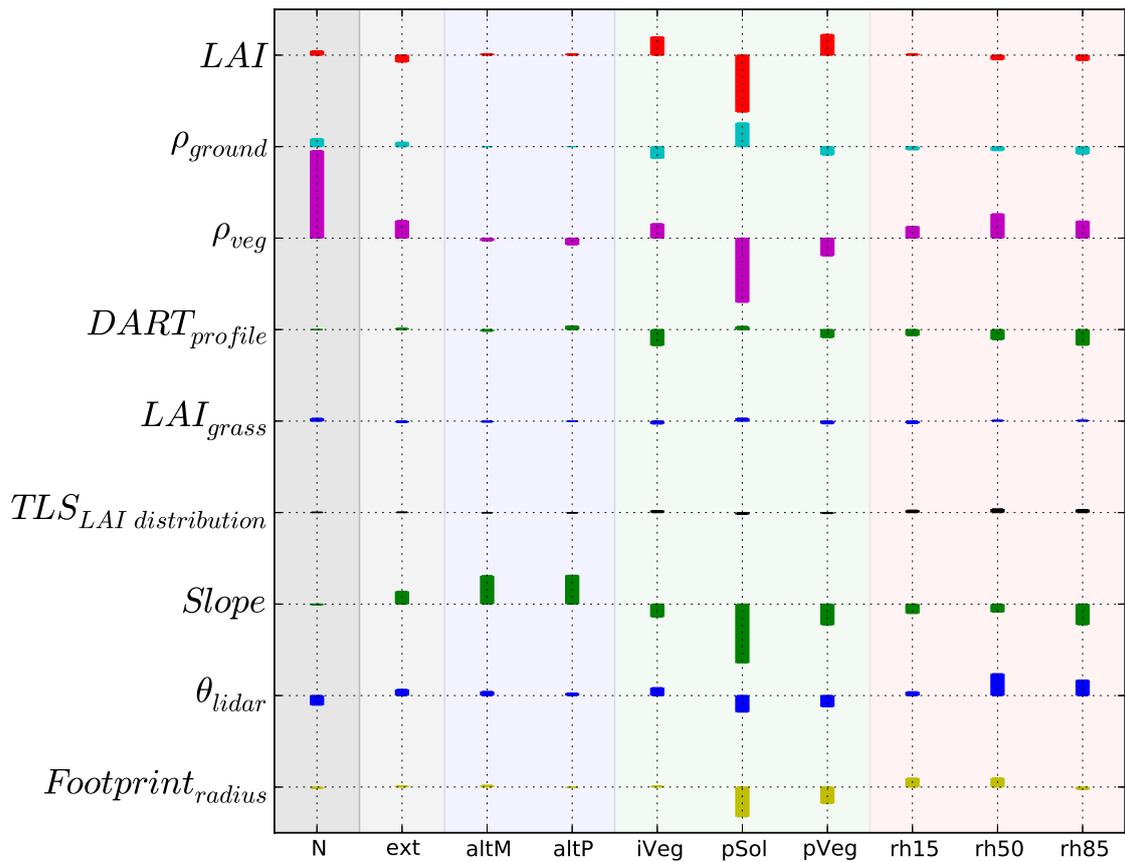


FIGURE 59 – Sensibilité globale de chaque paramètre sur chaque métrique Lidar, calculées avec les maquettes TLS sur toutes les placettes du site de la Réunion

VII Dimensionnement du capteur

Dimensionner un capteur Lidar spatial signifie trouver le bon compromis entre d'une part les caractéristiques du capteur permettant de retrouver le ou les paramètres biophysiques du paysage observé (*e.g.* biomasse, type et hauteur du peuplement) et d'autre part le faisabilité technique du concept compte tenu des contraintes d'un instrument embarqué sur un satellite (poids, puissance électrique disponible, coût). Dans l'étude présente, on ne s'intéresse qu'à la première partie, c'est à dire l'optimisation des paramètres du capteur pour observer les paysages terrestres, en particulier forestiers. Cela implique donc de définir les attributs forestiers que l'on veut mesurer et de définir les méthodes d'inversion du signal Lidar permettant d'effectuer la mesure à partir des données Lidar.

La hauteur du peuplement est un paramètre clé pour caractériser une forêt (*e.g.* la plupart des allométries utilisées pour calculer la biomasse sont basées sur la hauteur des arbres, et l'analyse de sensibilité a montré sa stabilité aux paramètres de la végétation). Le LAI et le taux de couverture sont aussi des caractéristiques importantes, car elles permettent en outre de classer des types de forêt ou de décrire l'état du peuplement.

En première approche, on va s'intéresser à la mesure de la hauteur du peuplement, pour laquelle le Lidar est particulièrement bien adapté. La méthode générale d'estimation de la hauteur comprend 3 étapes : 1) détermination du premier retour significatif (*i.e.* au dessus du bruit) de la WF, qui correspond donc à l'altitude du haut de la canopée, puis 2) estimation de l'altitude du sol³, et enfin 3) soustraction de l'un par rapport à l'autre. La première étape est relativement simple avec un SNR (signal-to-noise ratio) correct, et la dernière est triviale. Mais la deuxième est plus complexe. Une solution simple consiste à utiliser un MNT externe, mais ce type de donnée n'est pas toujours disponible. La solution idéale consiste donc à utiliser le même signal Lidar pour déterminer l'altitude du sol et l'altitude maximale de la canopée. Or l'extraction de l'altitude du sol n'est possible que si le signal provenant du sol est supérieur au niveau de bruit dans le signal. Et plus un couvert forestier est dense moins il laissera pénétrer la lumière jusqu'au sol, diminuant ainsi le signal "sol".

1 Énergie théorique

Dans cette section on veut donc déterminer quels sont les niveaux d'énergie parvenant au capteur depuis le sol, en fonction des caractéristiques du paysage et du capteur. Pour comparer les longueurs d'onde, on exprime les niveaux d'énergie en nombre de photons plutôt qu'en milli-Joules. Le tableau 60 montre l'équivalence entre le nombre de photons et l'énergie en mJ pour 3 longueurs d'onde classiques du Lidar.

	0.532 μm	1.064 μm	1.55 μm
Énergie d'un photon [mJ]	3.7339e-22	1.867e-22	1.2816e-22
Nombre de photons pour 1 mJ	2.6782e15	5.3563e15	7.8029e15

FIGURE 60 – Équivalent mJ / nombre de photons pour 3 longueurs d'onde

L'équation générale donnant l'énergie théorique reçue au niveau du capteur provenant du sol ($E_{theorique,sol}$), en fonction de l'énergie incidente sur la scène, de son LAI et de son taux de couverture T_c est donnée par :

$$E_{theorique,sol} = E_{lidar} \cdot T_{atmos}(\Omega)^2 \cdot (\cos(\theta) \cdot d\Omega \cdot \frac{\rho_{sol}}{\pi} \cdot (T_c \cdot e^{-G \cdot LAI / \cos(\theta)}) + (1 - T_c)) \quad (5)$$

avec :

- T_c : le taux de couverture [0 – 1]
- $T_{atmos}(\Omega)$: la transmittance atmosphérique dans la direction du lidar (Ω)
- θ : l'angle de visée
- $d\Omega$: l'angle solide selon lequel est vu le capteur (défini par la surface du télescope, l'altitude de l'instrument, et la direction de visée : $d\Omega = S_{detecteur} / (H / \cos(\theta))^2$)
- ρ_{sol} : la réflectance du sol

3. On considère ici le cas simple d'un sol plat, car le cas du sol en pente amène d'autres considérations sur la définition même des concepts de "hauteur du peuplement" et "altitude du sol"

- G : le facteur de distribution angulaire foliaire, égal à 0.5 en première approximation
- E_{lidar} : énergie émise (puissance lumineuse en sortie de l'instrument)

Cette énergie se répartit dans le temps en fonction de l'angle de visée et de la pente locale. T_{atmos} dépend de la longueur d'onde et de l'état de l'atmosphère. La proportion venant du sol est donc directement proportionnelle à l'énergie émise, la réflectance du sol, la surface du détecteur, à l'inverse de l'altitude au carré et à la transmittance atmosphérique au carré.

L'équation générale donnant l'énergie théorique reçue au niveau du capteur provenant de la végétation ($E_{theorique,veg}$) au premier ordre de diffusion, en fonction de l'énergie incidente sur la scène, de son LAI et de son taux de couverture T_c est donnée par :

$$E_{theorique,veg} = E_{lidar} \cdot T_{atmos}^2 \cdot [T_f(\Omega) \cdot d\Omega \cdot T_c \cdot (1 - e^{-G \cdot LAI / \cos(\theta)})] \quad (6)$$

avec :

- T_c : le taux de couverture [0 – 1]
- T_{atmos} : la transmittance atmosphérique
- θ : l'angle zénithal de visée
- Ω : direction de visée (θ, ϕ)
- $d\Omega$: l'angle solide
- G : le facteur de distribution angulaire foliaire, égal à 0.5 en première approximation
- E_{lidar} : énergie émise (puissance lumineuse en sortie de l'instrument)
- $T_f(\Omega)$: la fonction de transfert du milieu, qui donne la proportion de rayonnement rétrodiffusé vers le capteur, en fonction de l'énergie interceptée par la végétation, de l'angle solide selon lequel est vu le capteur et de la réflectance, transmittance et orientation (LAD) des feuilles.

Cette énergie se répartit dans le temps en fonction de l'angle de visée et de la profondeur du couvert. En fait, le point crucial se trouve dans le calcul de $T_f(\Omega)$. Cette fonction est notamment calculée par DART, par intégration discrète sur tous les angles foliaires :

$$T_f(\Omega) = \int_{\Delta\Omega} \frac{\int_{2\pi} \frac{g_f(\Omega_f)}{2\pi} \cdot |\Omega \cdot \Omega_f| \cdot f(\Omega_f, \Omega) d\Omega_f}{\int_{2\pi} \frac{g_f(\Omega_f)}{2\pi} \cdot |\Omega \cdot \Omega_f| \cdot d\Omega_f} \cdot d\Omega_f \quad (7)$$

avec :

- $g(\Omega_f)$ la probabilité que le vecteur normal moyen de la face supérieure des feuilles soit orienté selon la direction Ω_f . Elle peut être définie en utilisant un LAD standard (e.g. sphérique ou planophile).
- Ω_f angle zénithal de la normale de la face supérieure des feuilles
- et $f(\Omega_f, \Omega)$ la fonction de "réflectance apparente des feuilles dans la direction Ω ". Dans le cas de feuilles lambertiennes, la fonction de diffusion dans la direction du lidar $f(\Omega_f, \Omega)$ est donnée par :

$$f(\Omega_f, \Omega) = \frac{\rho_f}{\pi} |\Omega_f \cdot \Omega| \quad (8)$$

Typiquement, pour $G = 0.5$ (LAD sphérique) et une réflectance de feuille de 0.101, $T_f = 0.0213902 \cdot sr^{-1}$ à la verticale et ($T_f = 0.0214335 \cdot sr^{-1}$ pour un lidar à 20°). Pour une réflectance de 0.569 dans les mêmes conditions : $T_f = 0.120568 \cdot sr^{-1}$. L'angle solide $d\Omega$ est donné par $\frac{S}{H \cdot \cos(\theta)}$ [sr], avec S la surface du détecteur et H l'altitude du capteur. à 500 km pour une surface de 1 m², $d\Omega = 4.10^{-12} \cdot sr$

La figure 61 montre la proportion théorique d'énergie rétrodiffusée par le sol et la végétation (équations 5 et 6) pour un capteur lidar spatial d'1m² à 500 km d'altitude, visant à la verticale un sol lambertien de réflectance 1, couvert d'une végétation dont on fait varier le LAI et le taux de couvert, et sans atmosphère. Cela représente donc le cas idéal, où l'énergie est maximale. A cette altitude, un Lidar recevra donc toujours entre 0 (e.g. réflectance nulle) et 7.10^{-13} fois l'énergie émise.

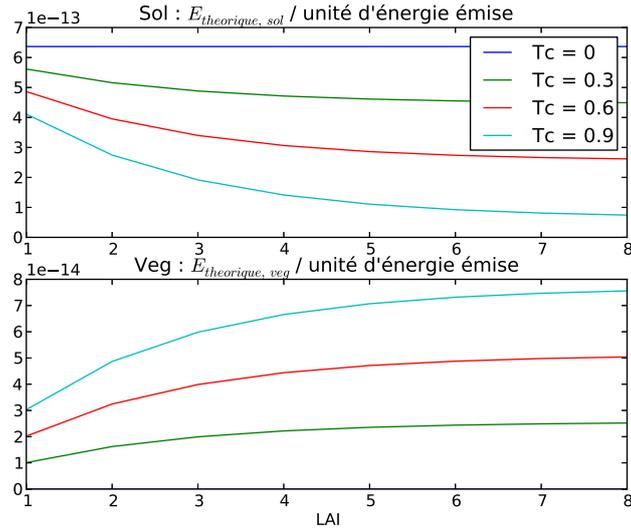


FIGURE 61 – Proportion théorique d'énergie rétrodiffusée par le sol et la végétation (équations 5 et 6) pour un capteur lidar spatial d' $1m^2$ à 500 km d'altitude, visant à la verticale un sol de réflectance 0.4, couvert d'une végétation dont on fait varier le LAI et le taux de couvert, et sans atmosphère

2 Impact de l'atmosphère

L'atmosphère réduit le signal (absorption) et y ajoute du bruit (diffusion de l'énergie provenant du Lidar et du soleil). Les profils de gaz et aérosols ont peu d'impact, mais c'est l'épaisseur optique totale des gaz et aérosols qui influe sur le signal. Pour quantifier cet impact, on a utilisé des simulations pour lesquelles on utilise différents modèles de répartition atmosphérique : "US-Standard" pour les gaz et "Urban-V5", "Rural-V5", "Rural-V23", "Desert-V76" pour les aérosols. L'utilisation de modèle de gaz différents implique des changements très mineurs sur la puissance du signal reçu.

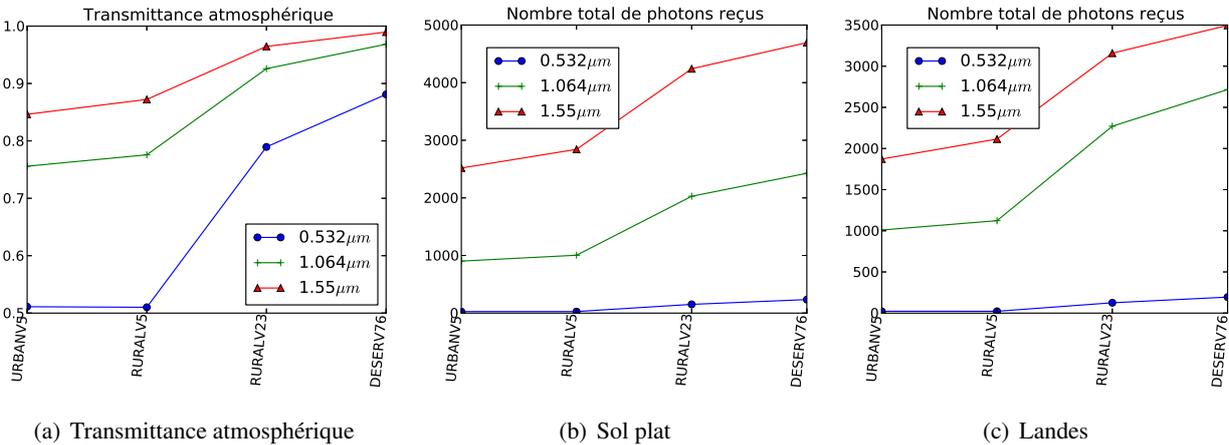


FIGURE 62 – a) Transmittance atmosphérique en fonction du modèle d'aérosol, en fonction de la longueur d'onde. b) et c) Nombre de photons reçus par un capteur Lidar spatial, en fonction du modèle d'aérosol et de la longueur d'onde, par mJ d'énergie émise, par unité de surface du télescope, pour une direction de visée verticale à 500 km d'altitude. b) Sol plat à gauche ($\rho_s = 0.113584, 0.404348$ et 0.492771 à respectivement $0.532, 1.064, 1.55 \mu m$), c) maquette TLS de la placette 14 des Landes à droite.

3 Bruit solaire

Le bruit solaire dépend de l'angle d'incidence du soleil. La figure 63, montre le nombre de photons reçus par un capteur lidar spatial, en fonction de la longueur d'onde, pour plusieurs types de paysage et d'atmosphère. On peut y voir que le niveau de bruit est très faible par rapport au niveau d'énergie reçu dans la plupart des cas (voir section précédente), y compris avec de l'atmosphère.

Il peut toutefois exister des cas de réflectance très faible et/ou de transmittance atmosphérique faible, et/ou de niveau d'énergie émise insuffisante, et/ou de surface de détecteur trop petite pour que le niveau du signal utile soit en-dessous du bruit solaire.

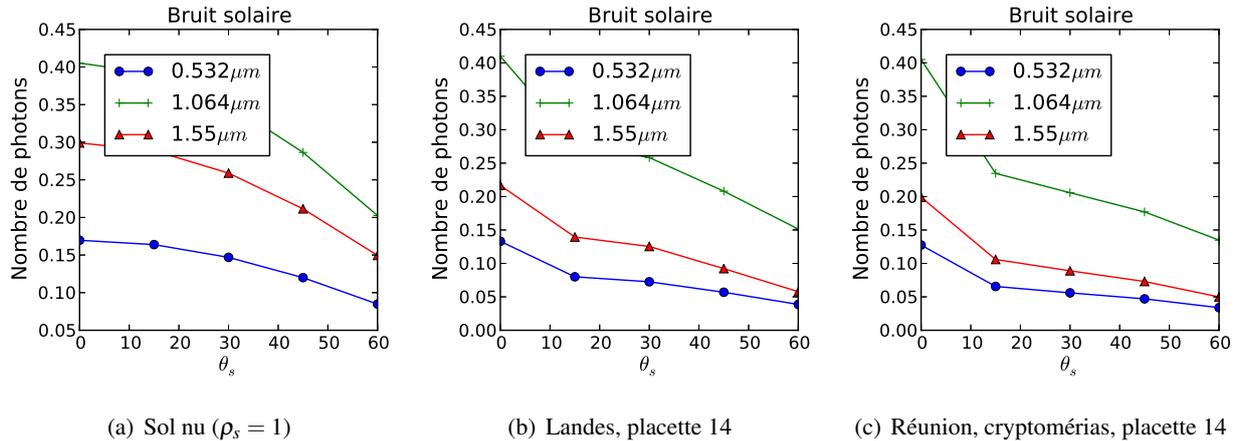


FIGURE 63 – Bruit Solaire reçu au niveau d'un capteur lidar spatial.

4 Conclusion

Les niveaux d'énergie à détecter par un capteur Lidar spatial sont très faibles. En effet, la puissance d'émission du Lidar est limitée par la puissance utile du satellite (et la durée de vie de la mission), et l'énergie rétrodiffusée par la scène terrestre est une toute petite fraction de l'énergie émise. Il est donc très vraisemblable que le bruit engendré par l'électronique embarquée dans le Lidar soit en fait très supérieur au bruit provenant de l'atmosphère ou du soleil (pour un capteur Lidar classique, c'est-à-dire pas en mode "comptage de photon").

Les niveaux de bruit, et donc le dimensionnement du capteur, sont donc d'abord dépendants du bruit instrumental (qui n'est pas l'objet de cette étude). Pour l'instant la taille du télescope est déterminante pour le dimensionnement du capteur (le plus grand possible !), mais il existe une marge de progression dans la recherche et de développement des composants électroniques d'un Lidar, qui permettrait de mesurer des flux lumineux faibles avec un SNR correct et un petit télescope.

VIII Conclusion générale

L'étude menée au cours de ce post-doctorat a permis de :

1. valider la simulation du Lidar par le modèle DART, par comparaison avec des données réelles sur les placettes des Landes. De fortes similitudes ont pu être observées avec les maquettes non-optimisées (*i.e.* où les paramètres estimés n'ont pas été corrigés a posteriori), mais des différences notables sont aussi apparues. Elles peuvent s'expliquer par le manque de données terrain précises quant à la distribution de la végétation (*i.e.* densité moyenne du feuillage, LAI, taux de couverture, LAD, et allométries pour la géométrie des arbres "sucette") ou la réflectance des matériaux.
2. tester et valider différentes approches pour modéliser un couvert forestier. En particulier, il a été développé un outil pouvant intégrer facilement des données terrain (mesures de position, hauteur, dbh des arbres, mais aussi acquisitions TLS ou ALS), pour créer des maquettes utilisables dans DART, afin de simuler du Lidar ou des images multi- ou hyper-spectrales. Un outil d'agrégation de formes d'onde petite empreinte pour simuler un capteur large empreinte (ou simplement calculer des métriques à l'échelle d'une placette) a aussi été développé et testé. L'expérience de modélisation a montré que les différentes approches de modélisation de la végétation dans un modèle de transfert radiatif peuvent être équivalents, mais nécessitent différents niveaux de calibration :
 - La voxélisation de données TLS (dont un outil de création automatique de maquette a été développé) génère une maquette DART directement, en ayant simplement besoin de définir les propriétés optiques de la végétation et du sol
 - les maquettes "sucettes" (*i.e.* où les arbres sont représentés par des formes géométriques simples) nécessitent davantage de calibration : allométries pour les formes géométriques, positionnement des arbres (qui peut toutefois être approximatif quand on regarde à l'échelle de la placette), estimation du LAI (ou de la densité moyenne) et des propriétés optiques, ainsi que l'estimation de la distribution (profil + trous) du feuillage dans les houppiers.
 - les maquettes "triangles" sont les plus complexes à générer. Elles nécessitent non seulement des mesures botaniques précises et complexes (*e.g.* taille des entre-nœuds, orientation et diamètre des branches, architecture des plantes), mais aussi des mesures des règles écologiques qui ont permis la croissance de tel arbre dans telles conditions (règles de "croissance en peuplement").
3. proposer des métriques adaptées à la validation de la simulation (de la végétation et du signal lui-même), mais aussi à une meilleure inversion du signal.
4. mieux comprendre le signal Lidar. En particulier de quantifier la sensibilité des métriques (donc du signal) aux principales caractéristiques de la scène (distribution du LAI, pente, réflectance, distribution des arbres), du capteur (longueur d'onde, énergie d'impulsion), et de l'acquisition (direction de visée, atmosphère)
5. quantifier l'impact de la végétation, de l'atmosphère et du soleil sur les niveaux d'énergie et de bruit (non-instrumental) du signal.

L'utilisation de la plateforme de simulation sur d'autres sites (Guyane, Brésil) permettra d'étendre encore la validation des simulations. Elle permettra aussi de tester les métriques choisies dans de nouvelles conditions. Une méthode générale d'inversion pourra alors être proposée pour traiter les données des futures missions Lidar spatiales, afin de cartographier la végétation et en particulier les couverts forestiers à l'échelle globale.

A Rapport du vol ALS Landes

RAPPORT DE CAMPAGNE LIDAR ET PHOTO

VOL REALISÉ (détails en pages 2):

Date du vol:	05/04/2011
Aéronef:	Avion

LIDAR:	oui
PHOTO:	oui

CALCUL DE LA TRAJECTOIRE:

La trajectoire a été calculée avec les logiciels GrafNav (Novatel) et DelphINS (IXSEA).

Station GPS au sol (coordonées WGS84):

Latitude	Longitude	Hauteur	Site
44°24'18.000"	-0°30'10.000"	650.00	St Symphorien

Estimation de la précision de la position du système:

Précision en angles:	Roll, Pitch	<0.005°
	Heading	<0.01°
Précision en position:	x,y,z	< 5 cm

CALCUL ET TRAITEMENT DU SEMIS DE POINT:

Le calcul et le traitement sont effectués avec les suites logiciels de Riegl et Terrasolid.

Une classification sol/sursol a été réalisée. La classification de toute la zone a été contrôlée manuellement.

Couverture de la zone à lever:	totale : 60 km ²
Densité moyenne:	10 pts/m ²
Densité moyenne des points sol:	3.8 pts/m ²

LIVRABLES:

Système de coordonnées: RGF93 - Lambert 93, altitude IGN69.

Type	Format	Nombre
Semis brut	xyz	274 dalles de 500 m x 500 m
Semis sol	xyz	274 dalles de 500 m x 500 m
Tableau d'assemblage	dwg	1
Tableau d'assemblage	dxf	1
Photos	TIFF	303

B Rapport de calibration avec le spectralon sur la campagne Paracou

Rapport : calibration données Lidar LMS Q560

Eloi Grau

CNES / IRSTEA - eloi.grau@gmail.com

8 juin 2015

I Introduction

L'objectif de la calibration des données Lidar est de retrouver des formes d'ondes ("waveforms") Lidar exprimés en nombre de photons (ou en Joules), afin d'améliorer leur exploitation (*e.g.* caractériser la réflectance du sol et de la végétation, inverser le signal pour estimer des profils de LAI), à partir des données Lidar brutes (exprimés en Comptes Numériques). La calibration est aussi utile pour valider radiométriquement les simulations de mesures Lidar (notamment DART). La validation radiométrique des simulations permettra de s'assurer du dimensionnement (qui concerne principalement la définition de la longueur d'onde, de l'énergie d'impulsion du laser, de la divergence du faisceau et de la taille du télescope) d'un système conçu en particulier pour l'observation des milieux forestiers. Aussi, l'estimation et l'étude des niveaux de bruit dépendent d'une simulation correcte des grandeurs physique d'intensité du rayonnement.

II Problématique

Le "gain" instrumental est le ratio du signal de sortie sur celui d'entrée. C'est un paramètre essentiel, si l'on veut exprimer le signal en grandeurs physiques. Or, dans le cas des systèmes Lidar, il est inconnu, car aucun fabricant ne fournit cette information. Le gain est dit "linéaire" si ce rapport est constant quelque soit l'amplitude du signal d'entrée. Afin de mieux comprendre la problématique, on propose donc d'essayer de schématiser le fonctionnement du détecteur. N'étant pas un expert de l'instrumentation et du traitement du signal, ces points sont sujets à discussion :

1. un flux de photons arrive à l'entrée du télescope. Le télescope possède sa propre fonction de transfert (qui dépend des caractéristiques optiques - miroirs, lentilles, et notamment de la surface du détecteur), c'est-à-dire son propre gain.
2. le flux en sortie du télescope arrive au niveau du détecteur. Il convertit le flux de photons en flux électrique. Généralement, 2 types de détecteurs sont utilisés : soit un tube photomultiplicateur (PMT), soit une photodiode à avalanche (APD). Chaque type possède ses propres caractéristiques en termes d'efficacité quantique (*i.e.* efficacité à détecter un photon, de l'ordre de quelques % pour les PMT à 80 % pour les APD), de domaine spectral, de gain, de prix, d'encombrement, etc.
3. Certains systèmes Lidar sont équipés d'un système de gain automatique (Automatic Gain Control - AGC), qui régule l'intensité du courant, pour éviter la saturation des systèmes électroniques en aval.
4. Ensuite, le signal électrique est numérisé, différemment selon le type de Lidar (first-return, multi-echo ou waveform). Dans le cas de systèmes à écho (first-, last- ou multi-echo) la détection des échos peut se faire en temps réel avec le système électronique sur le signal analogique, soit en post traitement sur le signal numérisé. Pour le cas d'un lidar full-waveform qui nous intéresse ici, le signal est numérisé en deux étapes : échantillonnage du signal et conversion en signal numérique (par un Convertisseur Analogique Numérique - CAN). En général l'espace de stockage des données, contraint le codage sur 8 bits du Compte Numérique (CN - soit une valeur entière comprise entre 0 et 255) correspondant à chaque "intensité échantillonnée dans un intervalle de temps" (*i.e.* "bin") de la waveform.
5. les instruments Riegl possèdent en fait deux canaux d'acquisition, afin de pouvoir enregistrer des signaux avec des intensités très différentes. Ainsi, il y a 2 gains à déterminer pour ces instruments (un gain "fort" et un gain "faible").

Ainsi, le gain théorique d'un instrument Lidar est très dépendant des éléments opto-electroniques constituant la chaîne d'acquisition. En général, aucun des élément n'est connu précisément et le gain global ne l'est donc pas a fortiori. De plus, compte tenu de la précision de la mesure (quelques micro Joules en quelques nano-secondes) les composants électroniques utilisés peuvent subir des fluctuations "aléatoires" de leur gain, ce qui rend leur calibration encore plus complexe voire impossible. Pour les instruments qui comportent un AGC, le

concept de "gain de l'instrument" ne semble même plus valable (le gain peut varier d'une mesure à une autre). Une étude approfondie des systèmes instrumentaux ou peut être une collaboration avec des fabricants de Lidar full-waveform serait certainement très utile.

Néanmoins, si on fait l'hypothèse d'un gain linéaire, il est possible de calibrer un instrument a posteriori : si on connaît le flux lumineux en entrée de l'instrument et le CN correspondant à la mesure pour plusieurs conditions d'acquisition (différentes réflectances et/ou distance de l'appareil à la cible), on pourrait quantifier le gain de l'instrument. Malheureusement, il est très difficile en pratique de mesurer directement le flux en entrée du Lidar puisque la mesure est très directionnelle (il faudrait être parfaitement aligné avec le télescope, mais sans interférer sur la mesure) et très ponctuelle dans le temps (quelques nanosecondes). Pour y parvenir, il faudrait plutôt mesurer l'énergie émise lors d'une impulsion du Laser, puis placer une plaque de Spectralon dont la réflectance est connue, à différentes distances du Lidar, perpendiculairement à la direction de visée. Compte tenu que l'énergie d'impulsion peut varier (notamment avec la température de du système, sachant que l'instrument est susceptible de chauffer au cours d'une campagne), ce serait bien de réaliser ces mesures dans les mêmes conditions que celle d'acquisition, dans la mesure du possible. Ceci permettrait d'estimer assez précisément le flux reçu au niveau du capteur, et de le comparer aux CN enregistrés par l'appareil.

La mesure de l'énergie d'une impulsion Laser nécessite un équipement spécifique et peut difficilement être déployée lors d'une campagne terrain, mais bien que de nature complexe il est envisageable d'effectuer ce type mesure sur l'instrument en laboratoire.

Lors d'une campagne terrain sur Paracou, une plaque de Spectralon a été survolée au cours d'une acquisition. En se basant sur différentes méthodes trouvées dans la littérature ou sur la modélisation, une tentative de calibration a pu être menée à partir de ces données.

III Données

La mission effectuée par AMAP à Paracou en 2013 a permis de collecter un jeu de données Lidar ALS sur le site d'étude (foret tropicale). Une plaque de référence (Spectralon) de réflectance 95% a été placée au milieu d'une prairie dans le site d'étude (coordonnées : (WGS84 UTMN22) $x = 286538.5$, $y = 582619$).

Le lidar utilisé est un Riegl LMS Q560. Les données fournies par Grégoire Vincent (IRD - AMAP) comportent les données brutes (fichiers Riegl sdc -stockant les échos- et sdf -stockant les waveform), la trajectographie (fichiers pof), les matrices de passage du repère Lidar au repère avion, ainsi qu'un fichier au format LAS contenant les échos extraits autour de la plaque de Spectralon (figure 1).

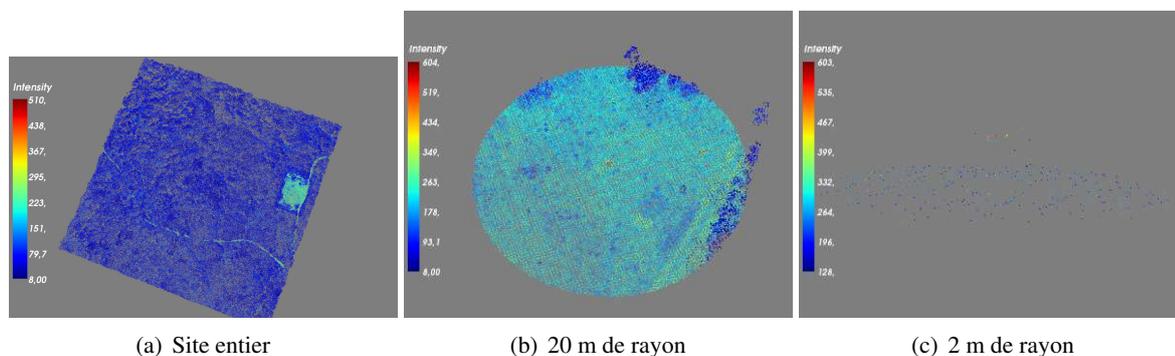


FIGURE 1 – Echos extraits du fichier las

Malheureusement, le programme interne à IRSTEA permettant d'extraire et de géoréférencer les formes d'onde à partir des fichiers sdf et sdc n'était pas encore opérationnel. Ainsi, pour extraire les 12 formes d'onde correspondant aux tirs sur la plaque, on a utilisé le temps Lidar correspondant aux échos sur la plaque dans le fichier LAS (qui est géoréférencé) pour extraire les formes d'onde qui ont le même temps Lidar dans le fichier sdf (avec l'aide d'Henri Debise). On obtient alors les formes d'onde de la figure 2 (gauche). A gauche (figures a et c) sont représentées les formes d'ondes provenant de la plaque (a : chaque forme d'onde, et c : moyenne des formes d'onde). A droite sont présentées des formes d'onde autour de la plaque (qui n'ont pas atteint la cible) à titre de comparaison. Depuis, les travaux de l'équipe ont avancé et il est possible aujourd'hui de géoréférencer les formes d'onde complètes à partir des fichiers sdf et pof, pour une emprise géographique connue

Pour chaque impulsion, l'instrument a enregistré l'onde émise et l'onde reçue. On peut remarquer que pour les formes d'onde sur les plaques l'onde reçue dépasse l'onde émise, ce qui signifie que les deux acquisitions ne sont pas directement comparables (le gain n'est pas similaire entre les deux "canaux d'acquisition" - or le

signal émis est forcément plus grand que le signal reçu). D'autre part, on peut remarquer une certaine variabilité sur l'intensité des points qui proviennent à la plaque (peut être dû à différents angles d'incidence des tirs sur la plaque). Aussi, les comptes numériques de 2 tirs sur 12 atteignent la limite de saturation (255).

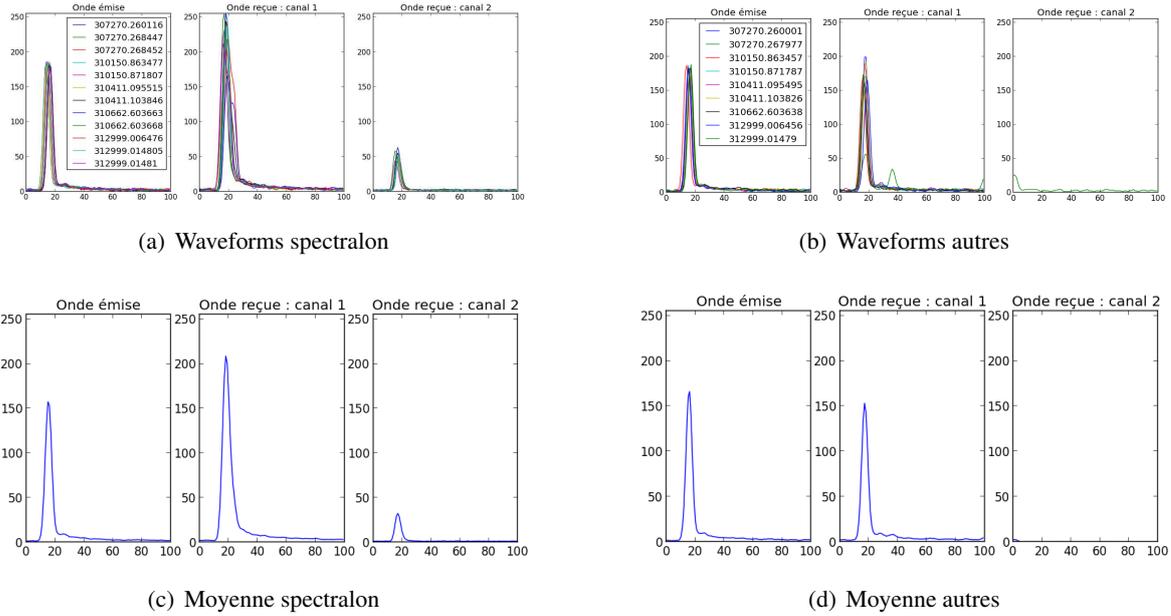


FIGURE 2 – Waveforms extraites des données brutes. Dans chaque sous-figure : ondes émises (gauche) ; ondes reçues (canaux 1 et 2, au milieu et au centre). Les valeurs dans les légendes correspondent aux temps Lidar des tirs affichés.

IV Méthodes de calibration

L'extraction de l'onde émise et de l'onde reçue pour chaque tir sur la plaque doit permettre de calculer une réflectance et / ou un coefficient de calibration. Nous présentons ici trois méthodes qui permettent de retrouver un coefficient de calibration (qui permet de relier la valeur d'un pic exprimé en CN à une réflectance) ou un gain instrumental (qui permet de calculer une intensité en nombre de photons depuis un CN). Cependant, même si rien n'indique a priori si le gain est linéaire ou s'il dépend de l'intensité reçue, nous faisons cette hypothèse pour pouvoir avancer.

Une approche serait de trouver un coefficient de calibration pour l'onde émise, à partir de la valeur de l'énergie de l'impulsion ($8\mu J$ pour le Riegl LMS Q560), qui pourrait être utilisée pour calibrer l'onde reçue. Cependant, comme l'onde reçue dépasse l'onde émise (en Comptes Numériques), il apparaît que le gain n'est pas le même, et donc cette méthode ne peut s'appliquer. La première et la deuxième méthode proposée ici relient la valeur des pics reçus et émis à la réflectance de la cible. La troisième méthode se base sur la modélisation pour relier les CN à l'intensité du rayonnement reçu.

IV.1 Méthode 1

Selon Wagner et al. [2006] on peut trouver un coefficient de calibration avec l'équation :

$$C_{cal} = \rho \cdot \frac{\beta_t^2}{R^2 \cdot P_R} \quad (1)$$

avec :

- ρ : la réflectance de la cible
- β_t : la divergence du faisceau
- R : la distance capteur-cible
- P_R : valeur du pic correspondant à la plaque (valeur max. en CN ou bien amplitude \times largeur du pic gaussien en CN)

Soit, si on considère la divergence du faisceau comme une constante de l'instrument :

$$C_{cal} = \rho \cdot \frac{1}{R^2 \cdot P_R} \quad (2)$$

Cette méthode permet, connaissant la valeur de la réflectance de la plaque ($\rho = 0.95$), d'obtenir une valeur C_{cal} qui permet de relier un pic (amplitude \times largeur) à une valeur de réflectance, pour cette campagne de mesure. On néglige alors les effets directionnels (du faisceau ou des éléments du paysage, *i.e.* distribution angulaire des feuilles) et les problèmes d'interception partielle du faisceau (dans le cas de multi-échos). On obtient une valeur du coefficient de calibration : $C_{cal} = 6.553428e - 09$ (canal 1) en supposant le Lidar à la verticale et volant à 500 m d'altitude.

Si on applique ce coefficient (calculé sur la moyenne des waveforms) à chacune des waveforms prises séparément, on trouve une réflectance moyenne de 0.912 et un écart type de 0.09 (voir figure 3).

IV.2 Méthode 2

Li et al. [2013] propose une équation permettant de relier le rapport onde reçue / onde émise à la réflectance (ρ) suivant :

$$\rho = \frac{4.R^2}{D^2 \cdot \eta_{atm} \cdot \eta_{sys} \cdot \cos(\alpha)} \cdot \frac{P_R}{P_T} = C_{cal} \cdot \frac{R^2}{\cos(\alpha)} \cdot \frac{P_R}{P_T} \quad (3)$$

avec :

- R : la distance capteur-cible
- D : le diamètre d'ouverture du capteur
- η_{atm} : la transmittance atmosphérique entre le capteur et la cible (aller-retour)
- η_{sys} : efficacité quantique du capteur (transmittance du système)
- α : angle d'incidence du faisceau sur la plaque
- P_R : valeur du pic reçu
- P_T : valeur du pic émis
- $C_{cal} = D^2 \cdot \eta_{atm} \cdot \eta_{sys}$: coefficient de calibration

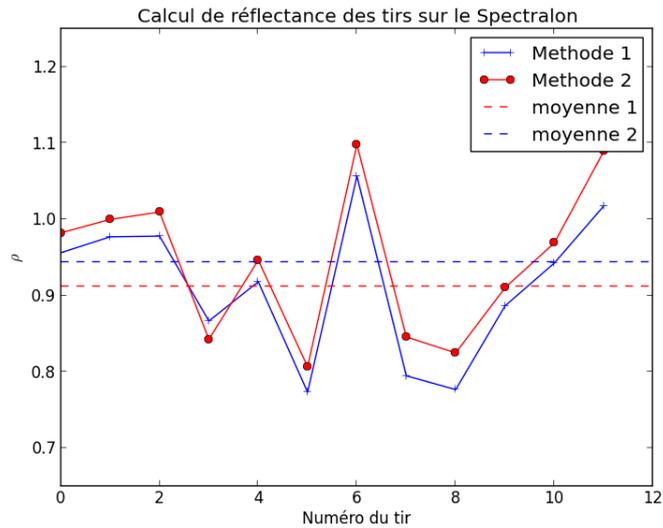
P_R et P_T peuvent être calculés comme la valeur max des pics, ou bien l'intégrale des pics, ou bien l'amplitude des pics multipliés par la largeur des pics.

ainsi :

$$C_{cal} = \rho \cdot \frac{\cos(\alpha) \cdot P_T}{R^2 \cdot P_R} \quad (4)$$

Cette méthode (similaire à la précédente, mais avec prise en compte de l'énergie émise et de l'angle d'incidence) permet de retrouver la réflectance de la cible, connaissant l'angle d'incidence, la distance à la cible et le rapport entre la valeur du pic reçu et émis. La dépendance de l'intensité en termes de rapport permet normalement de s'affranchir du problème de la méconnaissance du gain. En considérant l'acquisition moyenne sur la plaque et un lidar volant à 500 m au dessus au nadir, on trouve alors un coefficient de $C_{cal} = 2.135386e - 06$ sur le premier canal.

Si on applique ce coefficient (calculé sur la moyenne des waveforms) à chacune des waveforms prises séparément, mais en fixant l'angle d'incidence (inconnu), on trouve une réflectance moyenne de 0.943 et un écart type de 0.095 (voir figure 3). Par rapport à la méthode précédente, la prise en compte de l'énergie émise a donc amélioré un peu la la valeur de réflectance retrouvée (en moyenne). L'angle d'incidence de chaque tir n'a pas pu être extrait à ce jour, et donc n'a pas pu être testé.



(a) Waveforms spectralon

FIGURE 3 – Réflectances retrouvées à l'aide des coefficients de calibration calculés avec les méthodes 1 et 2, sur chacun des tirs sur la plaque de Spectralon.

IV.3 Méthode 3

Connaissant les caractéristiques d'acquisition, il est possible de simuler l'acquisition, et par comparaison des comptes numériques aux valeurs simulées, trouver le facteur de conversion (coefficient de calibration). La validité de ce coefficient dépendra de la validité (représentativité) de la simulation. Cela ne résoudra pas le problème de la variabilité du gain en fonction de l'intensité reçue (non-linéarité ?).

La simulation a les caractéristiques suivantes (tirées des caractéristiques du Riegl Q560 + hypothèses entre parenthèses) :

- lidar à 500 m d'altitude, au nadir (hypothèses)
- $\lambda = 1550 \text{ nm}$
- énergie du pulse : $8 \mu\text{J}$
- FWHM : 4 ns
- surface du détecteur : 0.01 m^2 (hypothèse : Riegl n'a pas voulu communiquer cette valeur)
- demi-angle d'émission : 0.00025 rad et demi-angle de réception : 0.0003 rad (valeurs sans effet puisqu'on considère que le footprint est entièrement inclus dans la plaque, et que la tache d'éclairage est entièrement incluse dans le Field Of View du Lidar)

On obtient un pic à 755 056 photons reçus provenant de la plaque (intégrale de la gaussienne). La valeur max du pic est de 88 837 photons, compte tenu des caractéristiques de la gaussienne d'émission. Si l'on considère le gain comme étant linéaire, le coefficient de calibration vaut : $C_{cal} = 88837/255 = 348.38 \text{ photons/CN}$.

V Conclusion

En considérant la linéarité du gain, il a été possible de trouver des coefficients de calibration permettant de convertir le signal en nombre de photons, ou permettant de retrouver une valeur de réflectance à partir d'un pic gaussien. Cependant, les valeurs n'ont pu être estimées qu'en posant des hypothèses fortes, ce qui limite cette calibration à cet instrument, pour cette campagne de mesure uniquement, et qui rend donc son usage limité. Le faible nombre de mesures Lidar effectivement tombées sur la plaque limite aussi la validation des approches, compte tenu du fait que les mesures ont toutes à peu près les mêmes caractéristiques en terme de distance à la cible, de divergence du faisceau et d'angle d'incidence.

La figure 3 montre les réflectances retrouvées avec les coefficients de calibration calculés dans cette étude. Elle montre que les approches 1 et 2 sont très similaires, et que la réflectance retrouvée est proche de la valeur réelle (0.95), ce qui tend à valider l'étude. Mais le manque de diversité des cas (en terme d'altitude de vol, de divergence du faisceau ou de réflectance de la plaque) ne permet pas d'affirmer le cadre de validité de ces approches. On peut effectivement retrouver une réflectance de 0.95 avec une assez bonne précision, mais il est difficile d'affirmer que c'est aussi valide pour une réflectance de 0.4. Cependant, en appliquant les coefficients de calibration sur les waveforms autour de la plaque, on obtient une réflectance de 0.493 et 0.484 (respectivement pour les deux méthodes), ce qui est réaliste pour un sol recouvert de végétation à 1550 nm. Les résultats montrent que la deuxième méthode paraît légèrement meilleure, sous réserve d'avoir l'angle d'incidence et l'onde émise pour chaque tir. Ceci dit, la définition de l'angle d'incidence pose problème pour un couvert forestier, où l'orientation des feuilles peut varier grandement.

Une étude approfondie du fonctionnement et des composants opto-électroniques de l'instrument devrait être menée pour mieux comprendre les éventuels problèmes et biais de la calibration qui repose sur des hypothèses qu'il faut pouvoir valider.

Pour une future mission Lidar, il apparaît que la mesure du signal émis serait un apport sérieux à la problématique de calibration de l'instrument. S'il était possible de faire passer le pulse émis à travers un instrument de mesure indépendant, puis le faire interagir avec un Spectralon (ou plusieurs, à différents pourcentages de réflectance) que l'on pourrait bouger sur un axe par exemple pour avoir plusieurs distances bien connues, l'étude de calibration en serait fortement améliorée. Mais cela semble en pratique très délicat à mettre en œuvre. En tout cas, cette étude montre que l'utilisation d'une plaque de spectralon à une position géoréférencée, dans un milieu ouvert peut permettre de trouver un coefficient de calibration pouvant faire le lien entre les mesures Lidar de la campagne et les réflectances terrain.

Pour le dimensionnement d'un futur capteur Lidar satellite, la physique du rayonnement peut être utilisée pour calculer et quantifier des flux de photons théoriques arrivant au niveau du capteur, ou en tout cas obtenir des ordres de grandeur vraisemblables, si tous les phénomènes affectant le signal sont bien pris en compte, y compris des différents facteurs de bruit. La connaissance actuelle de la physique du rayonnement doit pouvoir le permettre. Mais l'expérimentation restera toujours nécessaire.

Références

- X. Li, L. Ma, and L. Xu. Empirical modeling for non-lambertian reflectance based on full-waveform laser detection. *Optical Engineering*, 52(11), 2013.
- W. Wagner, A. Ullrich, V. Ducic, T. Melzer, and 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 Inversion du LAI

Soit une couche de végétation définie par son LAI, son taux de trouées (α) et sa fonction de transfert (T_f). T_f est fonction de la distribution angulaire foliaire et de la réflectance des feuilles. Il définit l'énergie rétrodiffusée vers le Lidar par une couche qui intercepte une unité d'énergie. Soit T_i la transmittance de la couche : $T_i = e^{(-G.LAI/\cos(\theta))}$.

Soit $N_{inc,i}$ un signal incident sur une couche i . Le signal intercepté par la couche est :

$$N_{int,i} = N_{inc,i} \cdot (1 - T_i)(1 - \alpha_i) \quad (9)$$

Le signal mesuré par le capteur provenant de la couche est :

$$N_i = N_{int,i} \cdot T_f \quad (10)$$

Le signal transmis à la couche $i + 1$ est :

$$N_{trans,i} = N_{inc,i} \cdot (\alpha_i + (1 - \alpha_i) \cdot T_i) \quad (11)$$

Si l'on considère que la couche i et la couche $i+1$ ont le même LAI (mais pas la même fraction de trouées α_i et α_{i+1}), alors il est possible de retrouver cette valeur en utilisant le rapport du nombre de photons mesurés par les couches i et $i + 1$

$$LAI = -\frac{\cos(\theta)}{0.5} \cdot \log\left(\frac{\frac{N_{i+1}}{N_i} - \alpha_i \cdot \frac{1 - \alpha_{i+1}}{1 - \alpha_i}}{1 - \alpha_{i+1}}\right) \quad (12)$$

Cette équation permet d'inverser le signal Lidar pour retrouver un LAI, connaissant le taux de trouées. Mais elle n'est valable que pour les parties décroissantes du signal, car si le signal est croissant, cela signifie que le LAI augmente, ce qui va à l'encontre de l'hypothèse de départ.

D Landes : Etude de sensibilité à la représentation de la végétation

1 Sensibilité au LAI



(m) Maquettes TLS

(n) Maquettes Hybrides

FIGURE 64 – Waveforms correspondant à la végétation en fonction du LAI, pour chacune des placettes (de haut en bas), simulations "TLS" à gauche, et "Hybride" à droite

2 Sensibilité à la réflectance du sol



(m) Maquettes TLS

(n) Maquettes Hybride

FIGURE 65 – Waveforms correspondant à la végétation en fonction de facteur de réflectance du sol, pour chacune des placettes (de haut en bas), simulations "TLS" à gauche, et "Hybride" à droite

3 Sensibilité à la réflectance de la végétation



(m) Maquettes TLS

(n) Maquettes Hybride

FIGURE 66 – Waveforms correspondant à la végétation en fonction de la réflectance de la végétation, pour chacune des placettes (de haut en bas), simulations "TLS" à gauche, et "Hybride" à droite

4 Sensibilité à la pente

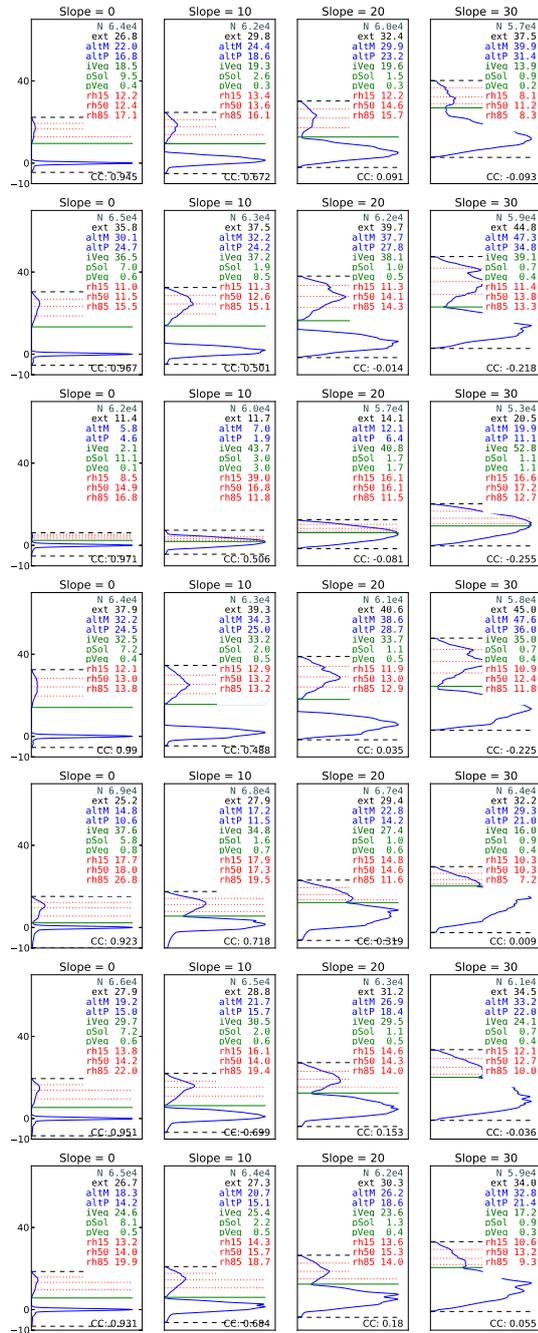


FIGURE 67 – Waveforms avec différentes pentes, pour chacune des placettes, maquettes "Hybrides"

5 Maquettes "TLS" : Sensibilité à la distribution du LAI

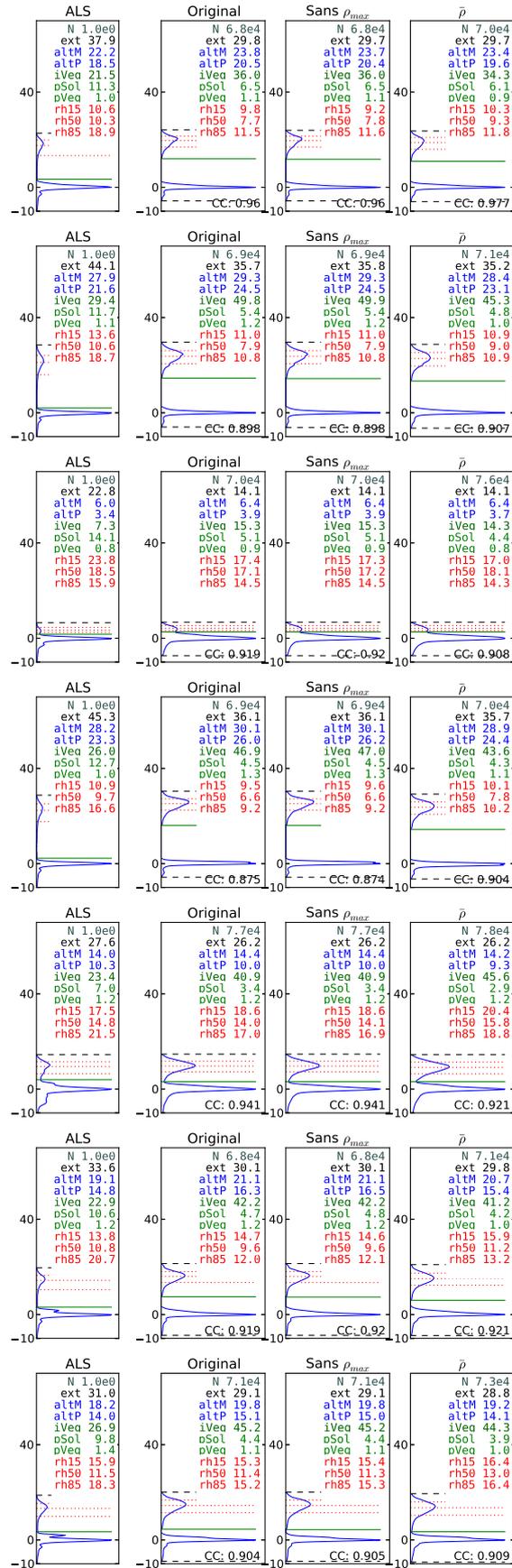


FIGURE 68 – Sensibilité à la taille des houppiers simulés, pour des arbres ellipsoïdaux.

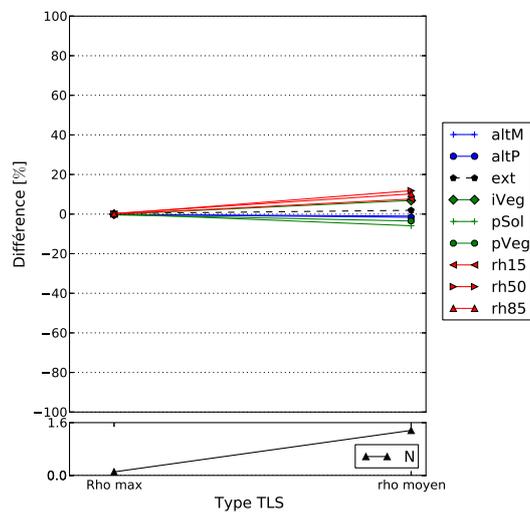


FIGURE 69 – Tendances des métriques en fonction de la répartition de la végétation dans les maquettes TLS.

6 Maquettes "sucettes" : Sensibilité à la distribution du LAI

6.1 Sensibilité à la taille des houppiers

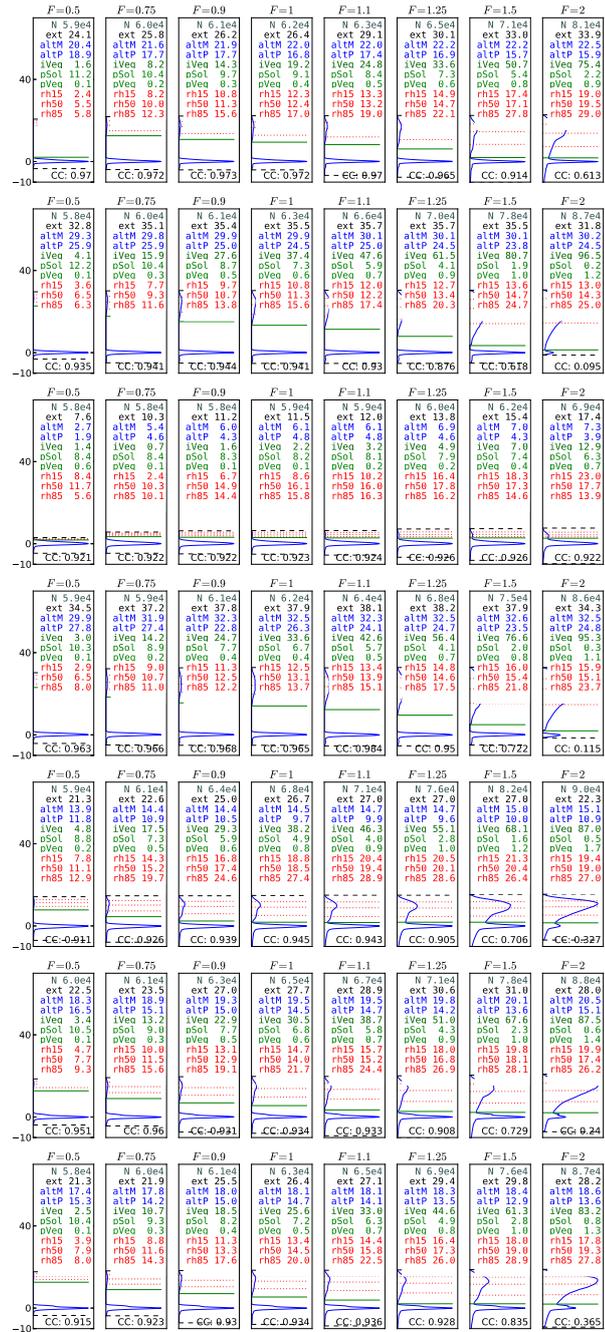


FIGURE 70 – Sensibilité à la taille des houppiers simulés, pour des arbres ellipsoïdaux.

6.2 Sensibilité au profil de LAI dans le houppier

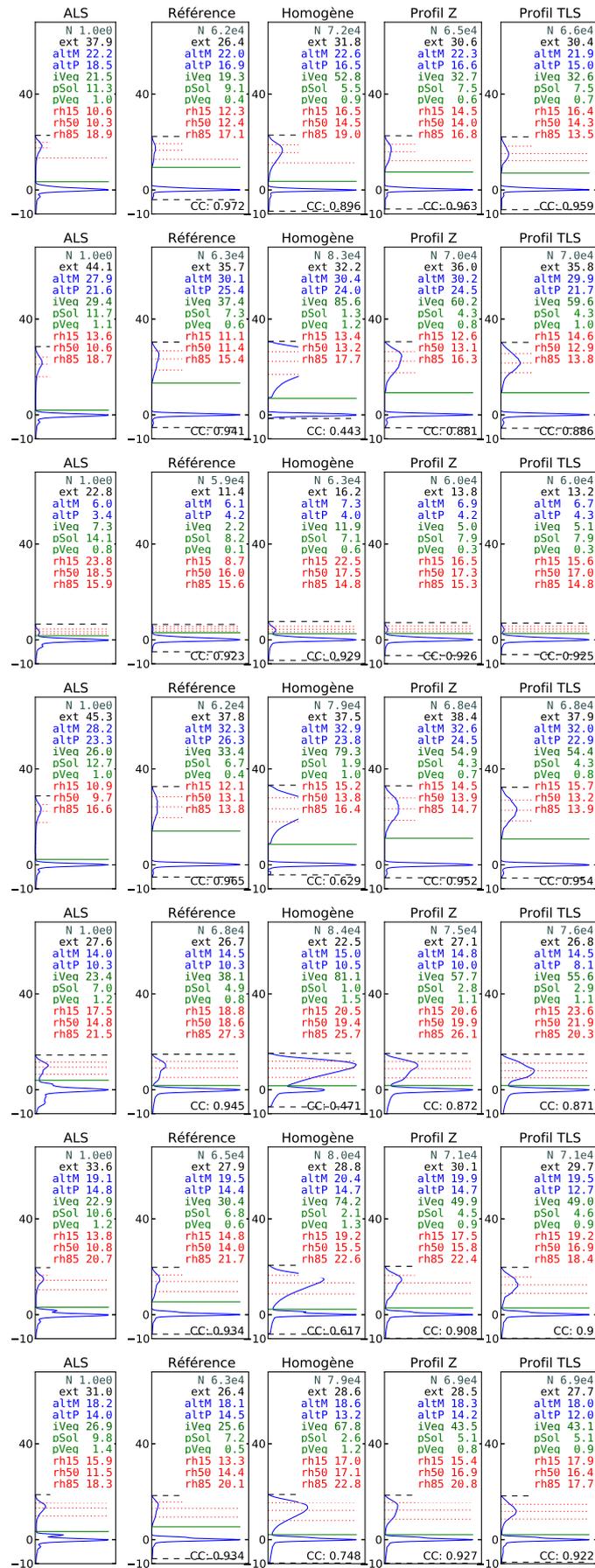


FIGURE 71 – Sensibilité à la distribution du LAI dans le houppier, pour chacune des placettes, maquettes "Hybrides"

6.3 Sensibilité à la présence de végétation sur le sol

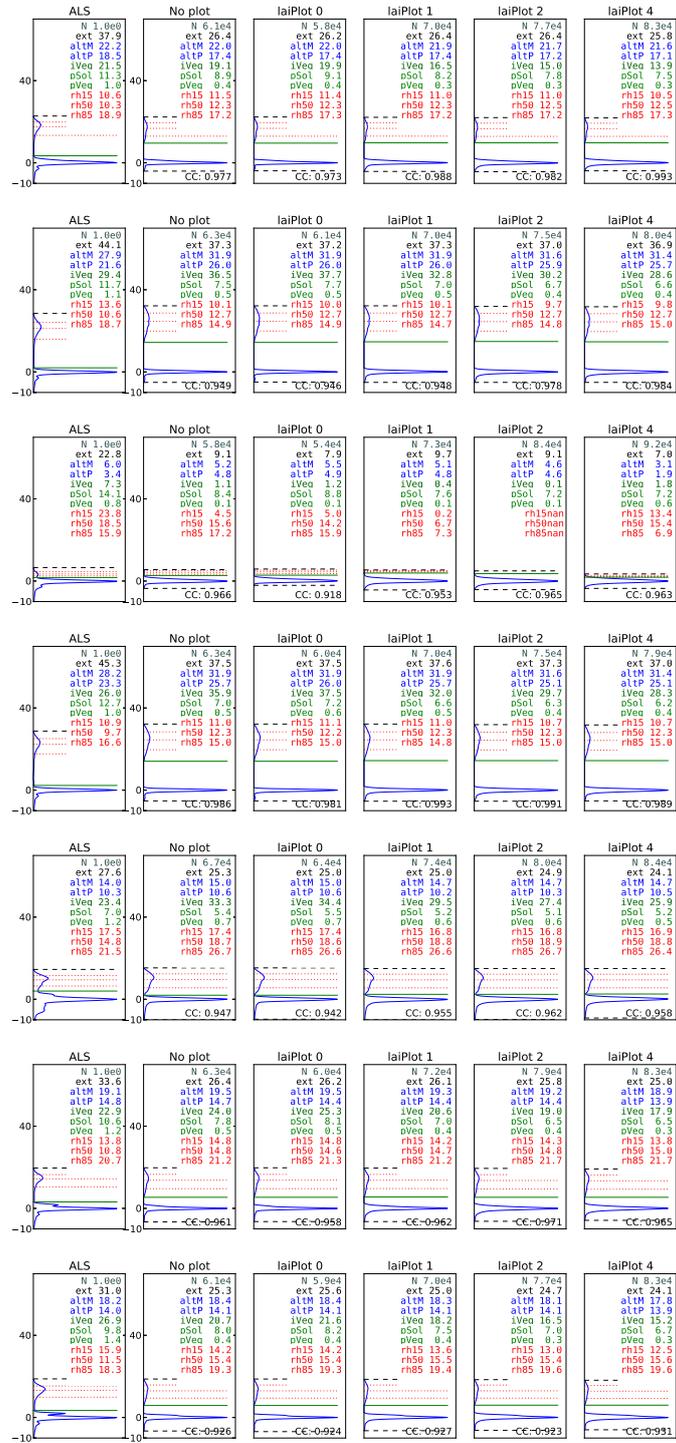


FIGURE 72 – Sensibilité à la présence de végétation sur le sol des maquettes, pour chacune des placettes, maquettes "Hybrides"

7 Maquettes "AMAP" : Voxelisation des houpiers

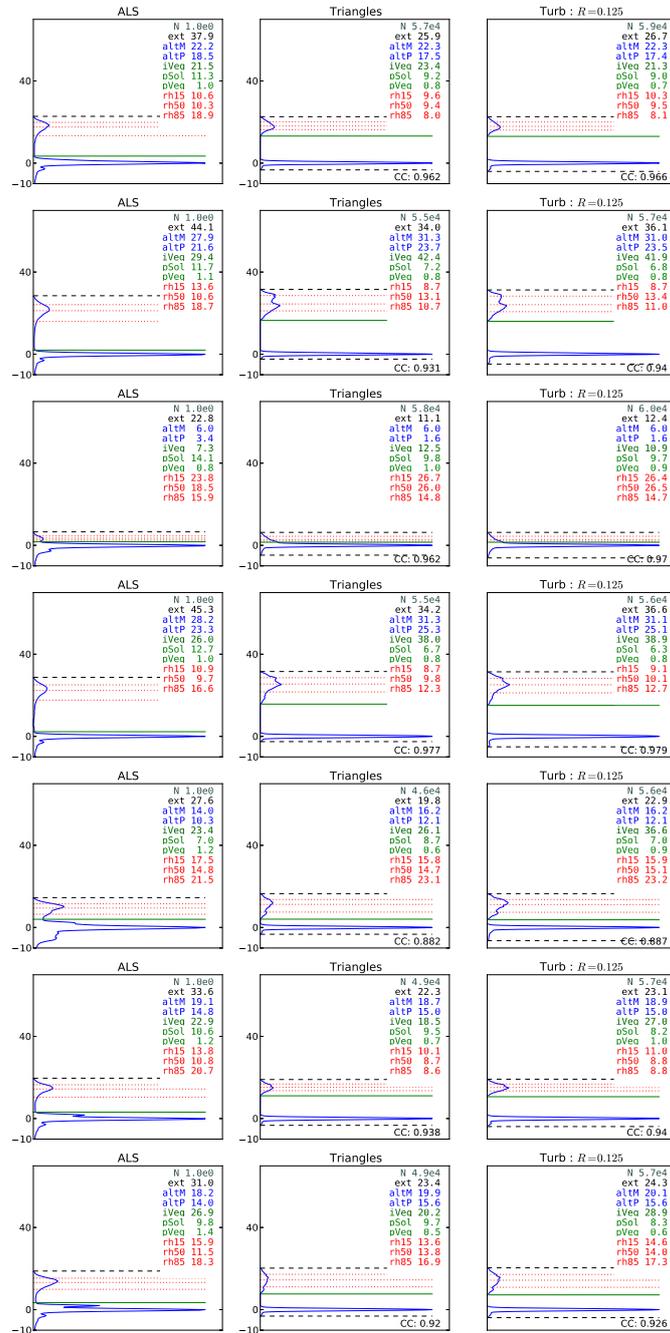


FIGURE 73 – Waveforms avec différents degrés de simplification du profil de LAI dans le houppier, pour chacune des placettes (maquettes "TLS")

8 Sensibilité aux paramètres capteur

8.1 Angle d'incidence

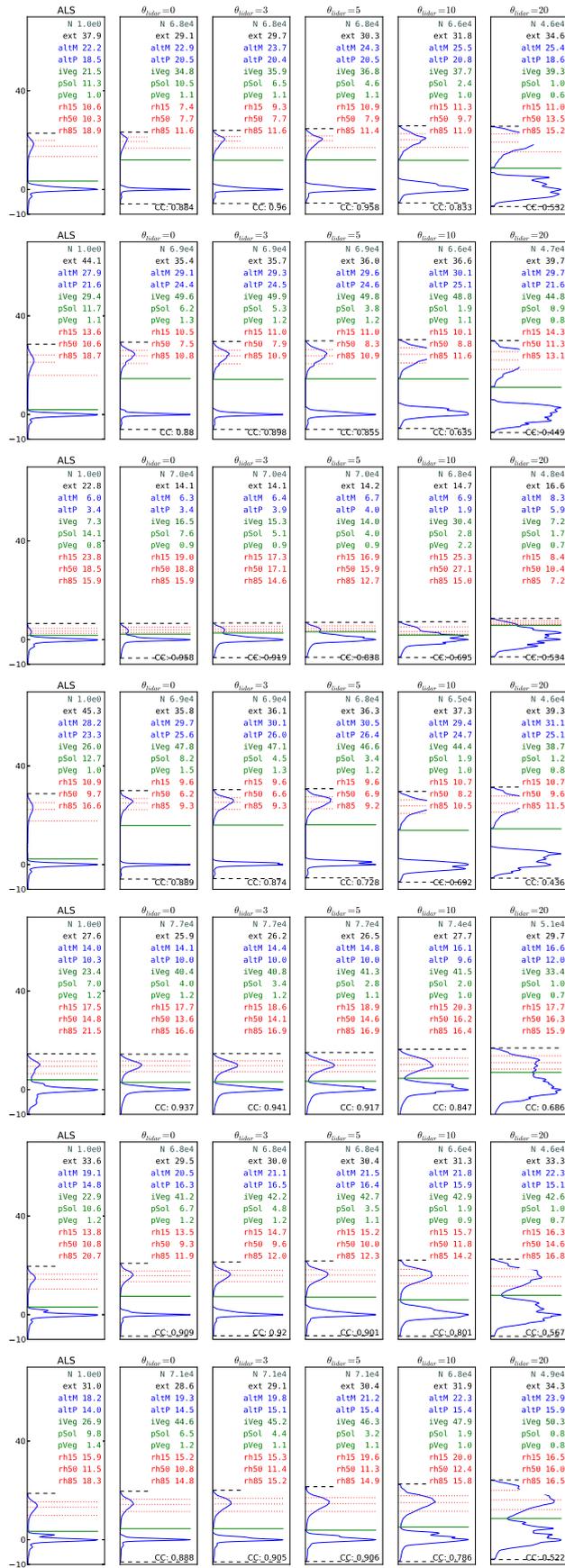


FIGURE 74 – Waveforms en fonction de l'angle d'incidence (θ) du faisceau (maquettes TLS), pour chacune des placettes (maquettes "TLS")

8.2 Rayon du footprint

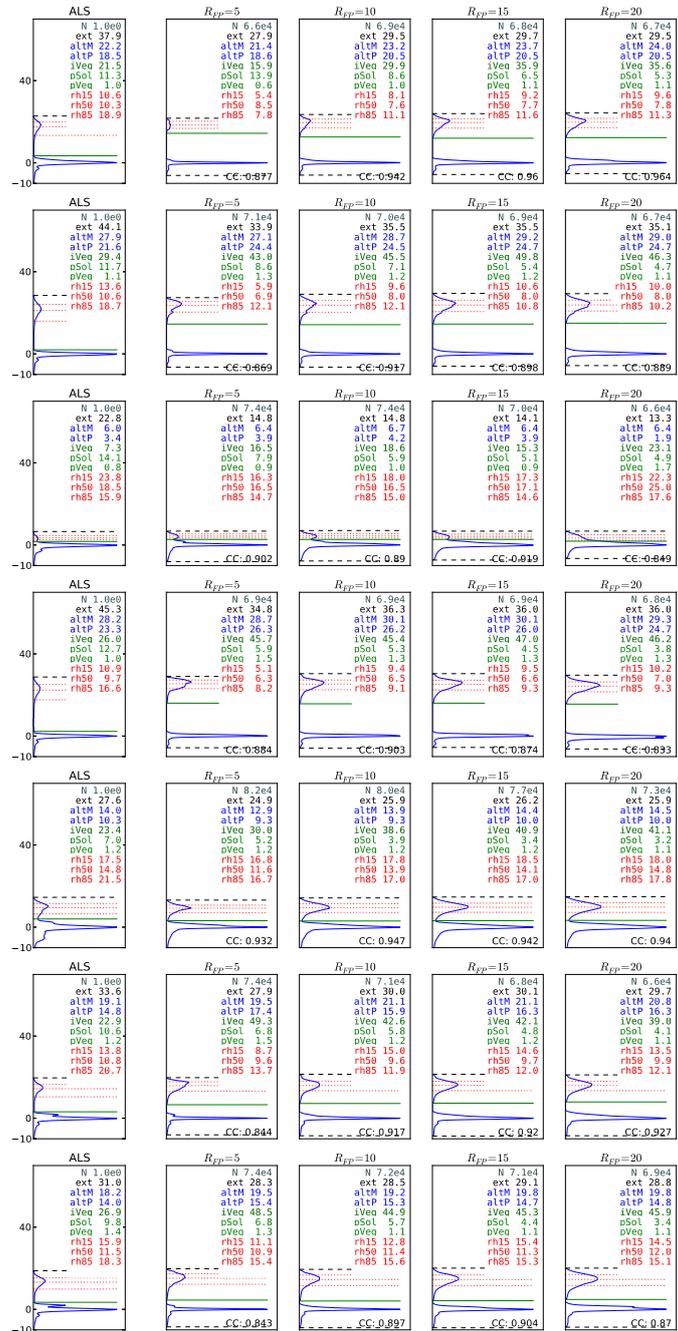


FIGURE 75 – Waveforms avec différentes pentes, pour chacune des placettes, maquettes "TLS"

8.3 Précision sur la position

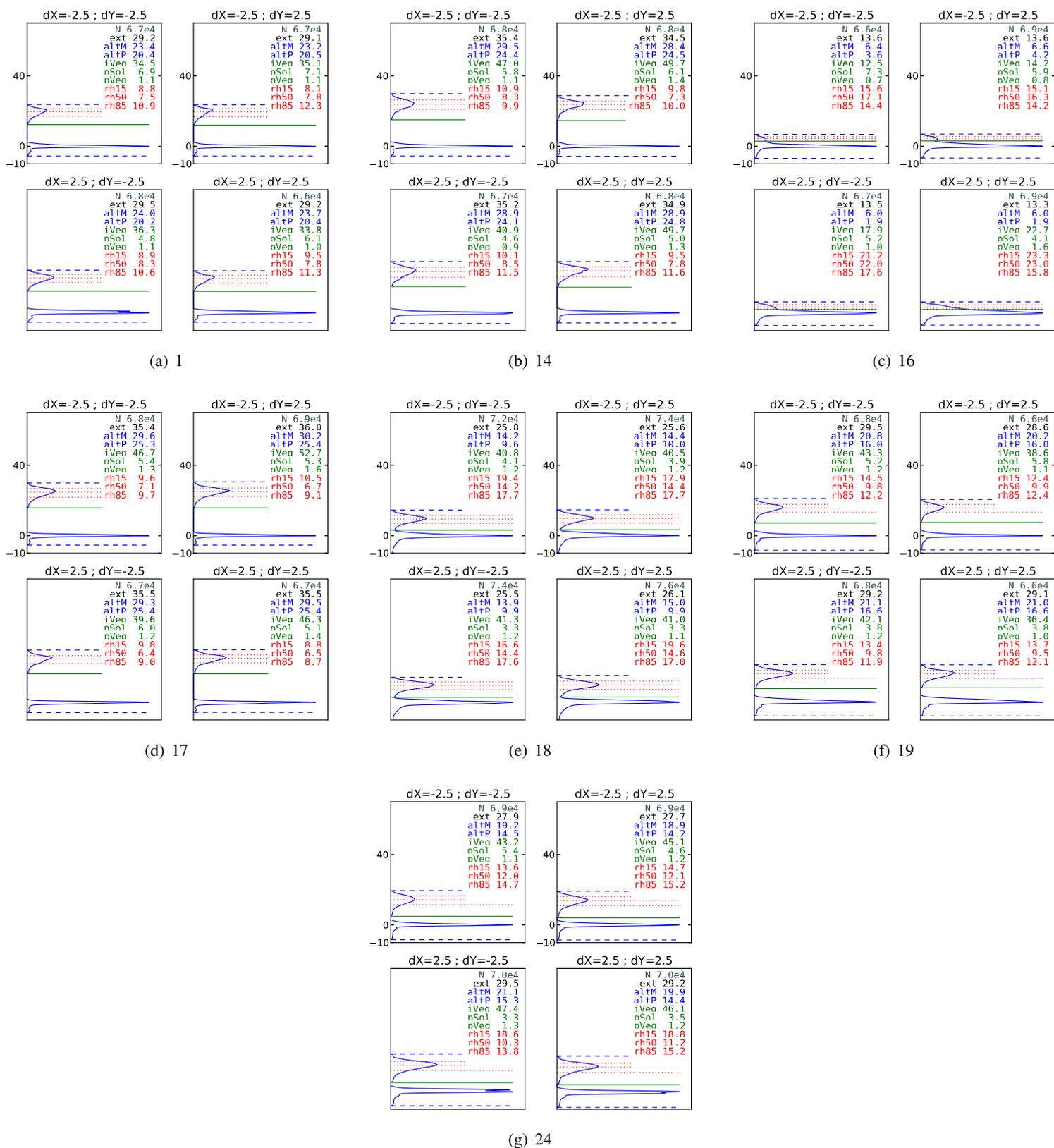


FIGURE 76 – Waveforms avec différentes pentes, pour chacune des placettes, maquettes "TLS"

E La Réunion

1 Waveforms de référence

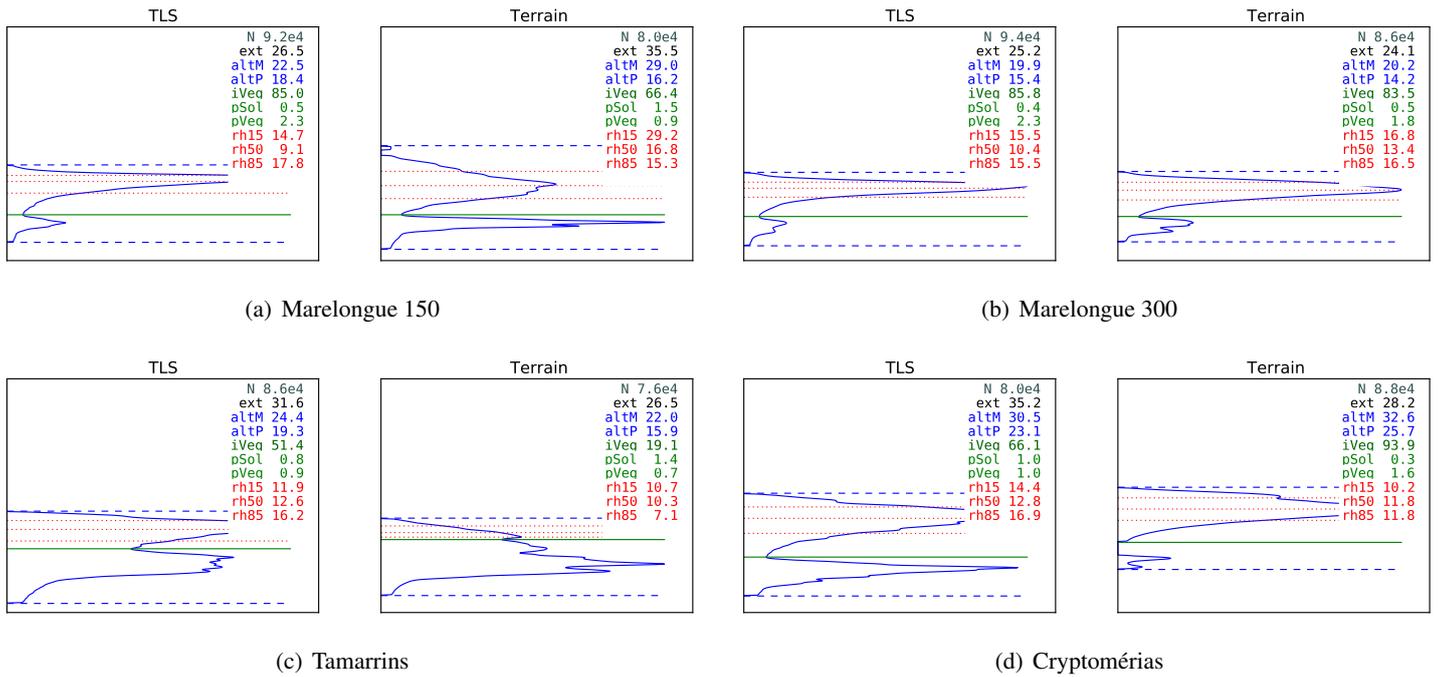


FIGURE 77 – Formes d'ondes simulées sur les 4 placettes, avec deux types de maquettes (TLS et Terrain)

2 Etude de sensibilité à la représentation de la végétation

2.1 Sensibilité au LAI

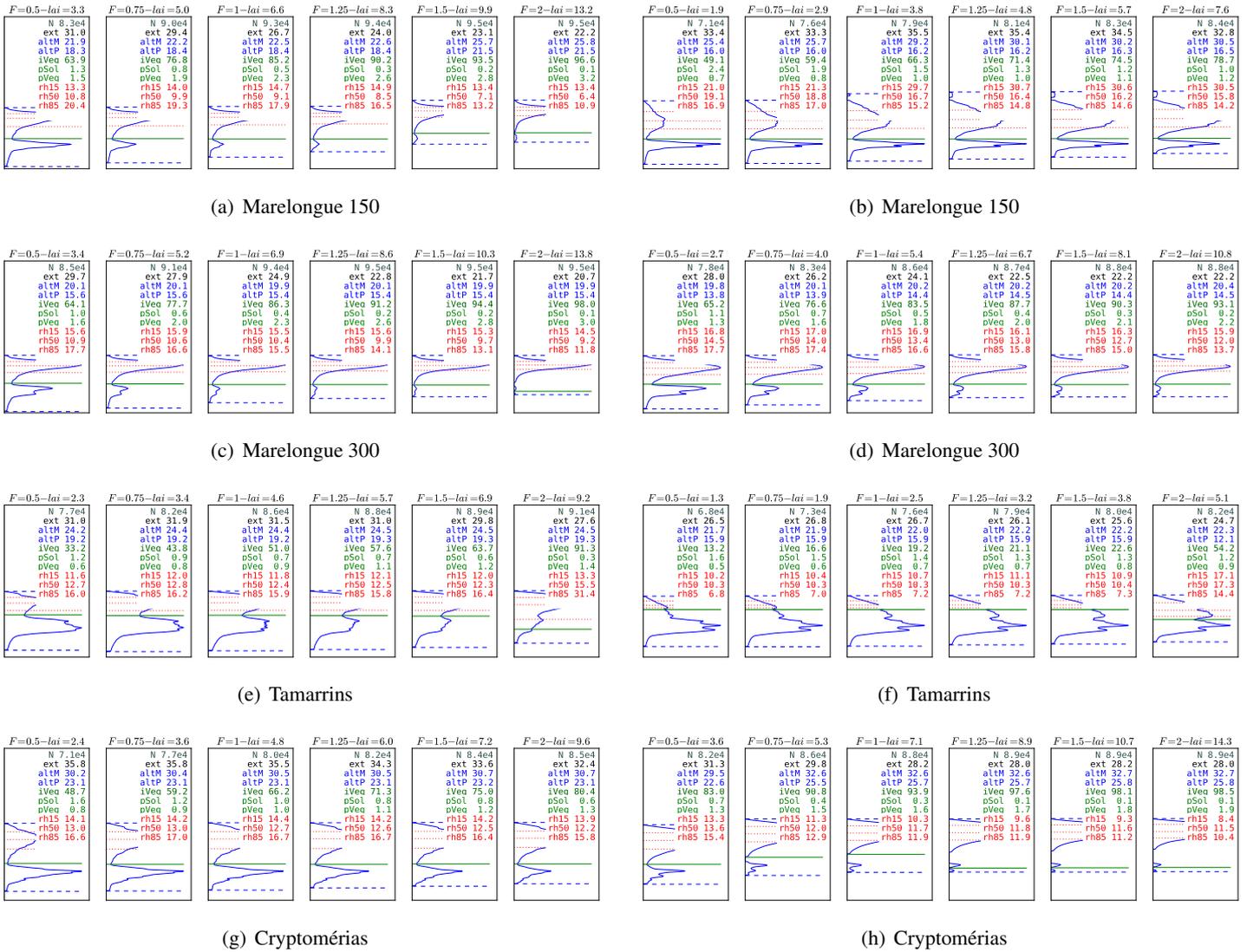
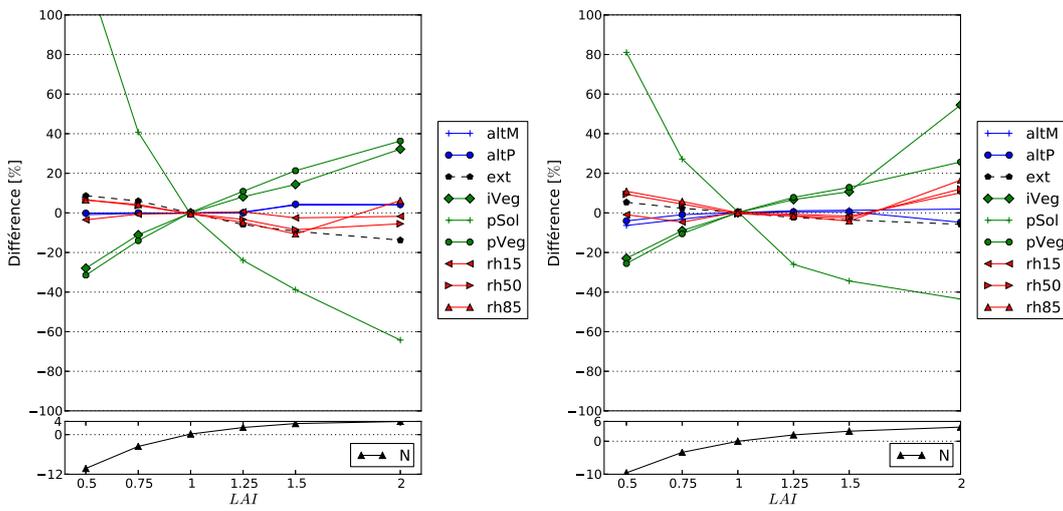


FIGURE 78 – Formes d'ondes simulées sur les 4 placettes en fonction du LAI (maquettes TLS à gauche et terrain à droite)



(a) maquettes TLS

(b) maquettes hybrides

FIGURE 79 – Tendances des métriques en fonction du LAI total de la scène : différences entre les métriques calculées sur les WF obtenues en faisant varier le LAI, et les WF obtenues avec la simulation de référence, exprimées en pourcentage.

2.2 Sensibilité à la réflectance de la végétation

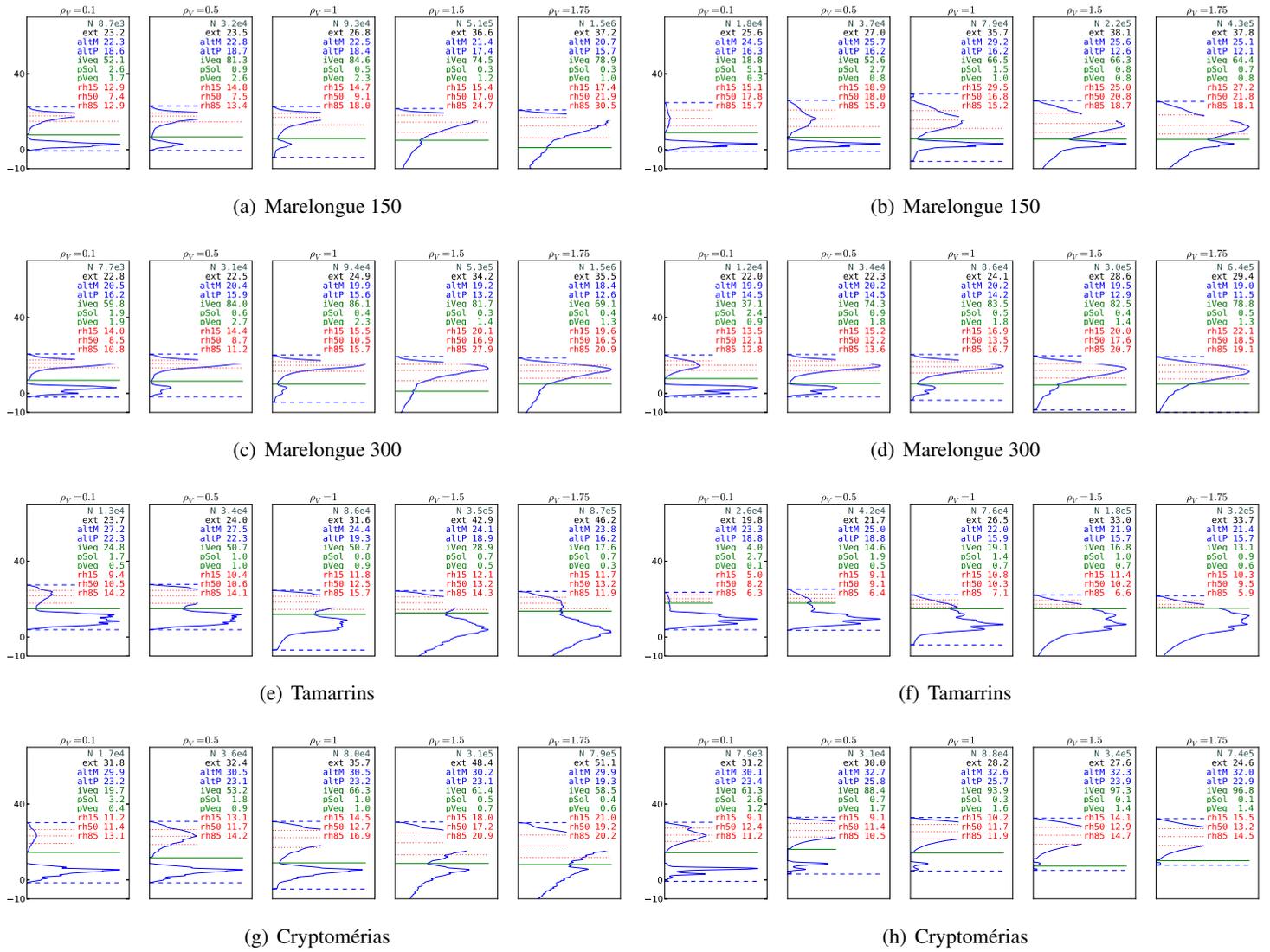


FIGURE 80 – Formes d'ondes simulées sur les 4 placettes en fonction de la réflectance de la végétation (maquettes TLS à gauche et terrain à droite)

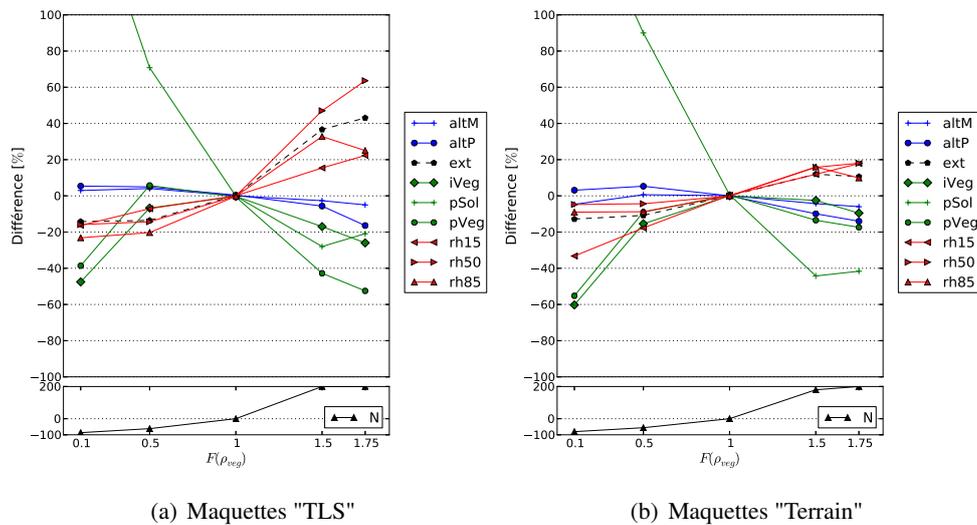


FIGURE 81 – Tendances des métriques en fonction de la réflectance de la végétation. A gauche : tendance par rapport à la simulation de base ; à droite : tendance par rapport aux mesures ALS cumulées

2.3 Sensibilité à la réflectance du sol

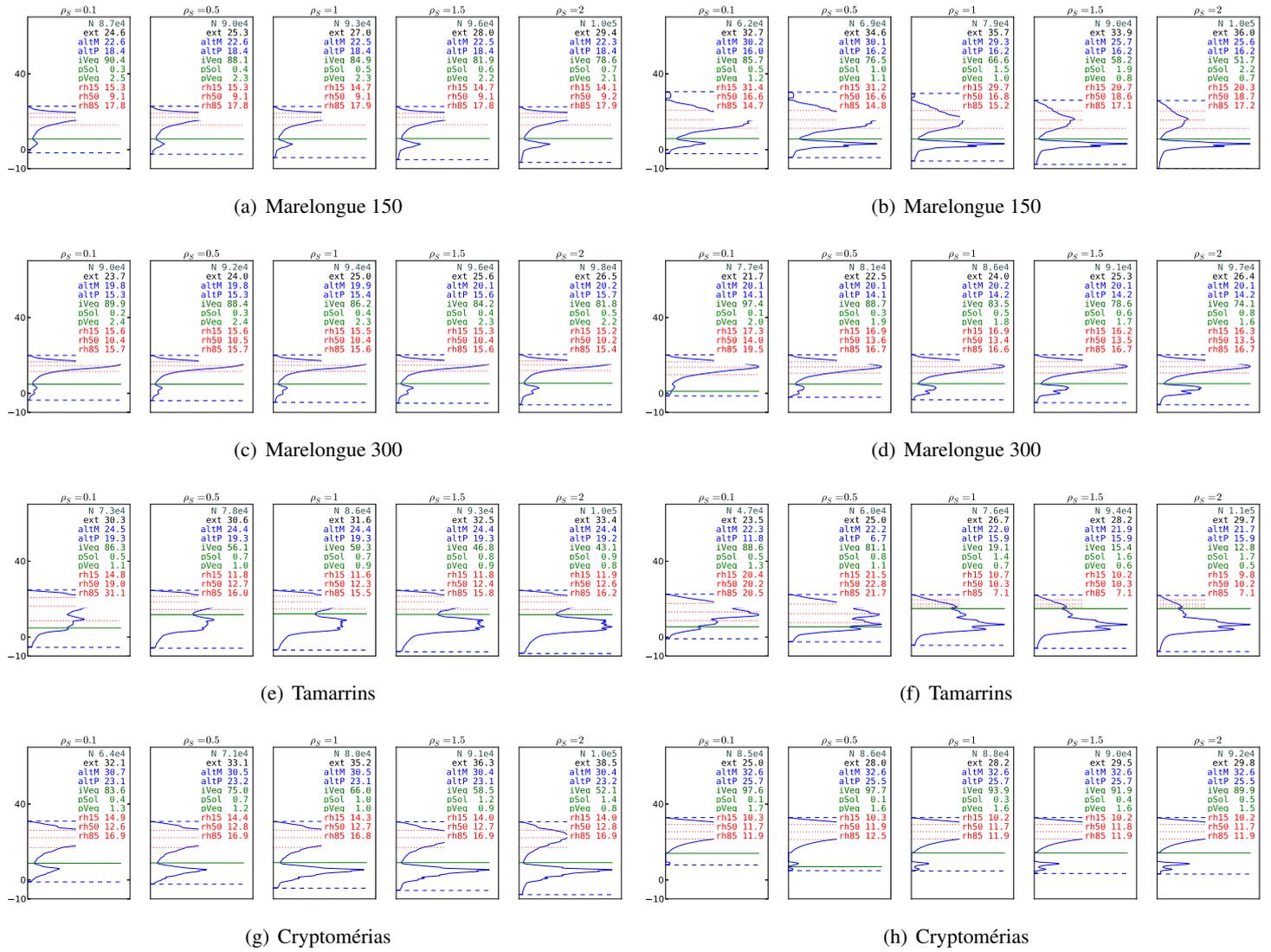


FIGURE 82 – Formes d'ondes simulées sur les 4 placettes en fonction de la réflectance du sol (maquettes TLS à gauche et terrain à droite)

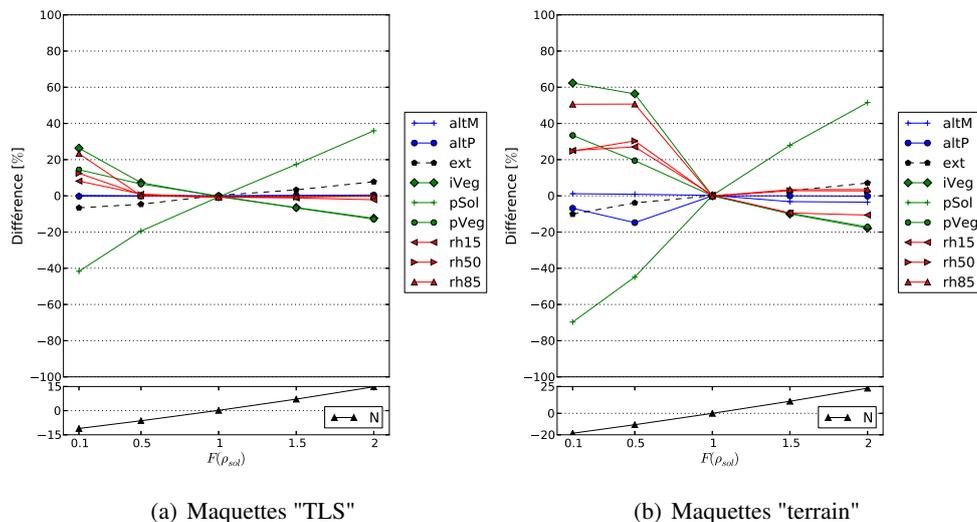


FIGURE 83 – Tendances des métriques en fonction de la réflectance du sol

2.4 Maquettes "Terrain" : Sensibilité à la présence d'une couche herbacée

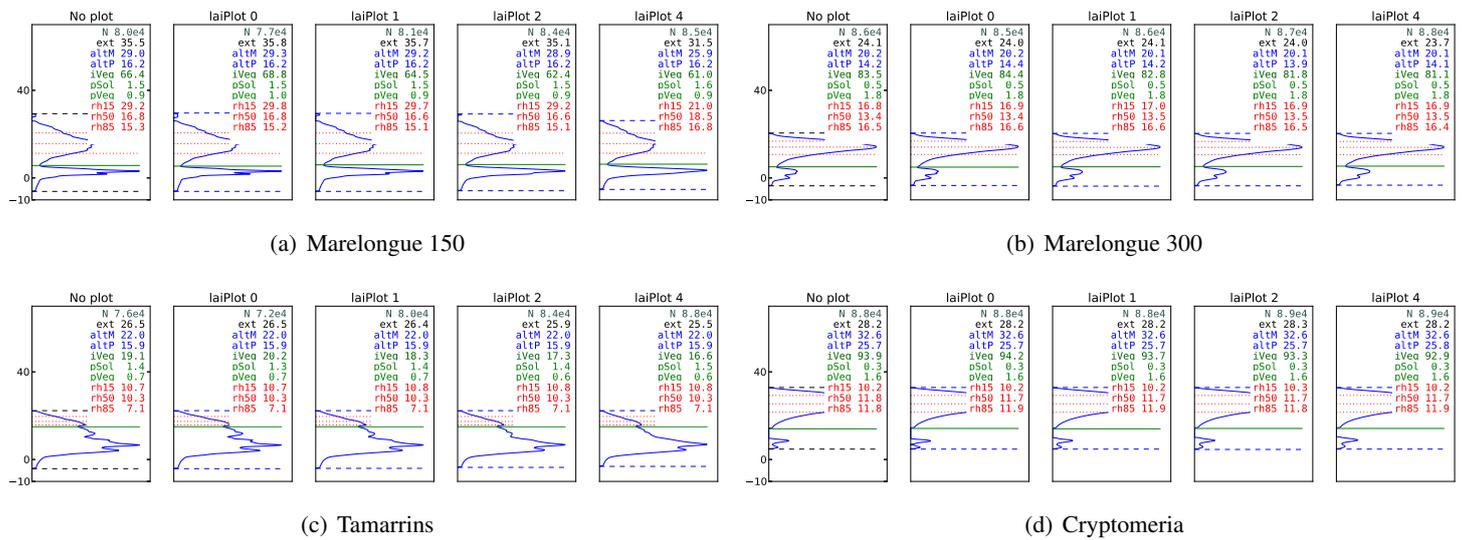


FIGURE 84 – Formes d'ondes simulées sur les 4 placettes en fonction de la réflectance du sol (maquettes "terrain")

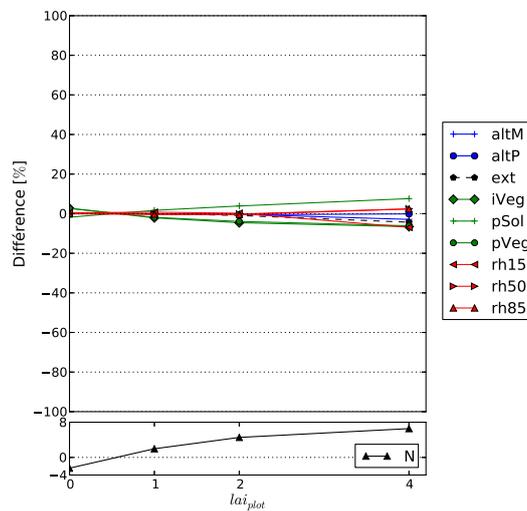


FIGURE 85 – Tendances des métriques en fonction de la densité de la couche herbacée, par rapport à la simulation de référence

2.5 Maquettes "Terrain" : Sensibilité à la pente

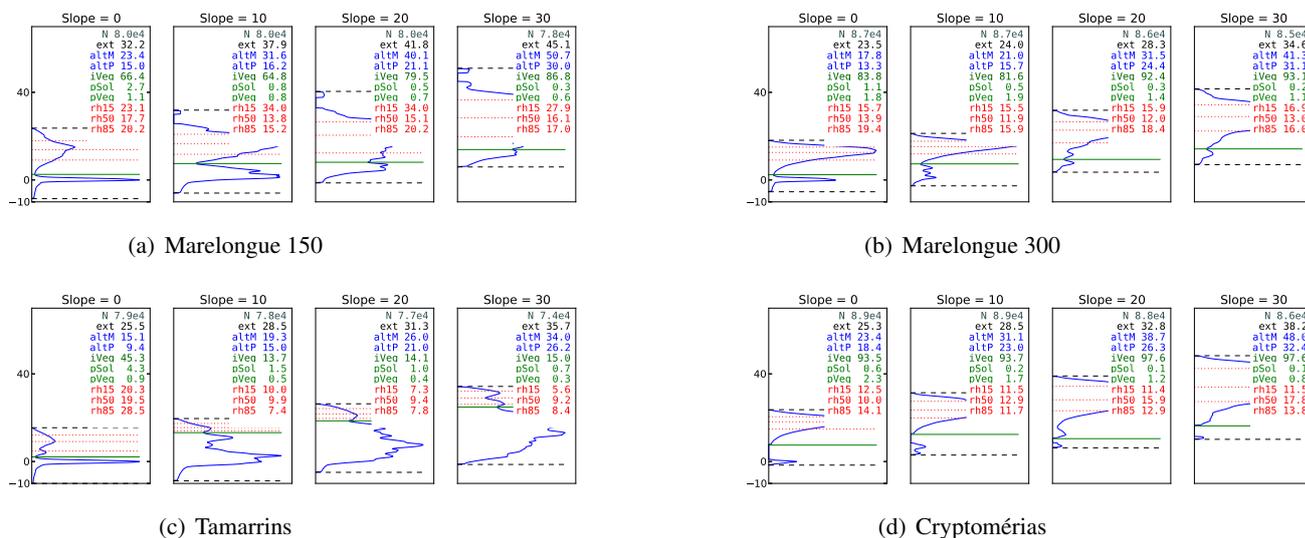


FIGURE 86 – Formes d'ondes simulées sur les 4 placettes en fonction de la pente (maquettes terrain)

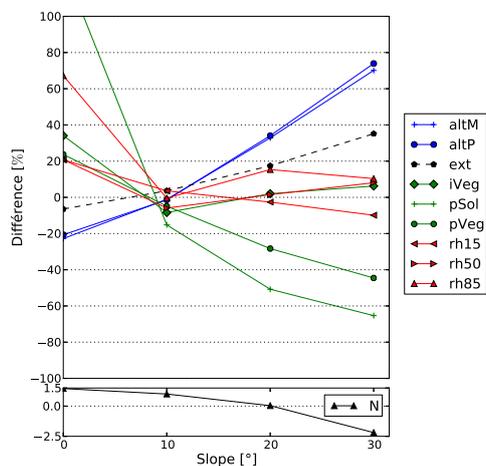
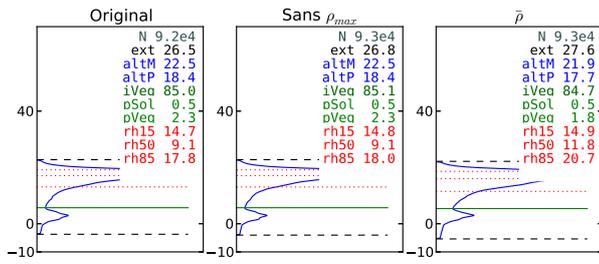
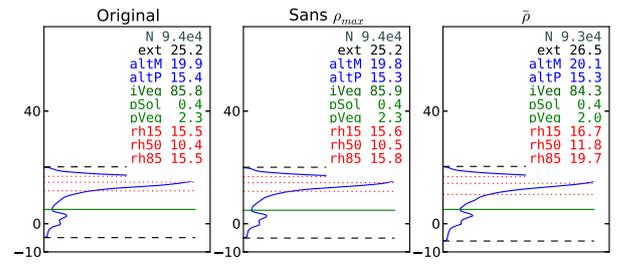


FIGURE 87 – Tendances des métriques en fonction de la pente de la maquette, avec un sol plat

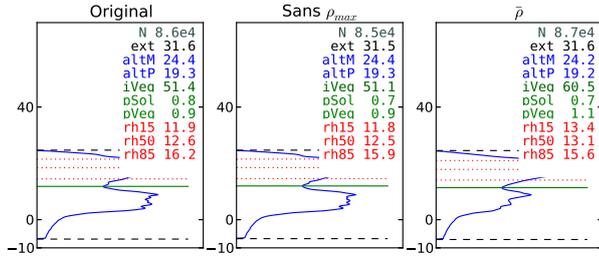
2.6 Maquettes "TLS" : sensibilité à la distribution du LAI



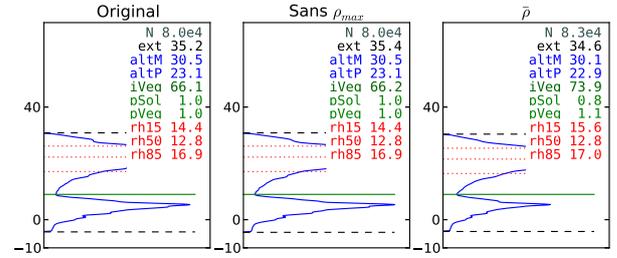
(a) Mareloung 150



(b) Mareloung 300



(c) Tamarrins



(d) Cryptomeria

FIGURE 88 – Formes d'ondes simulées sur les 4 placettes en fonction de la réflectance du sol (maquettes "terrain")

3 Etude de sensibilité aux paramètres capteur

3.1 Sensibilité au rayon du footprint

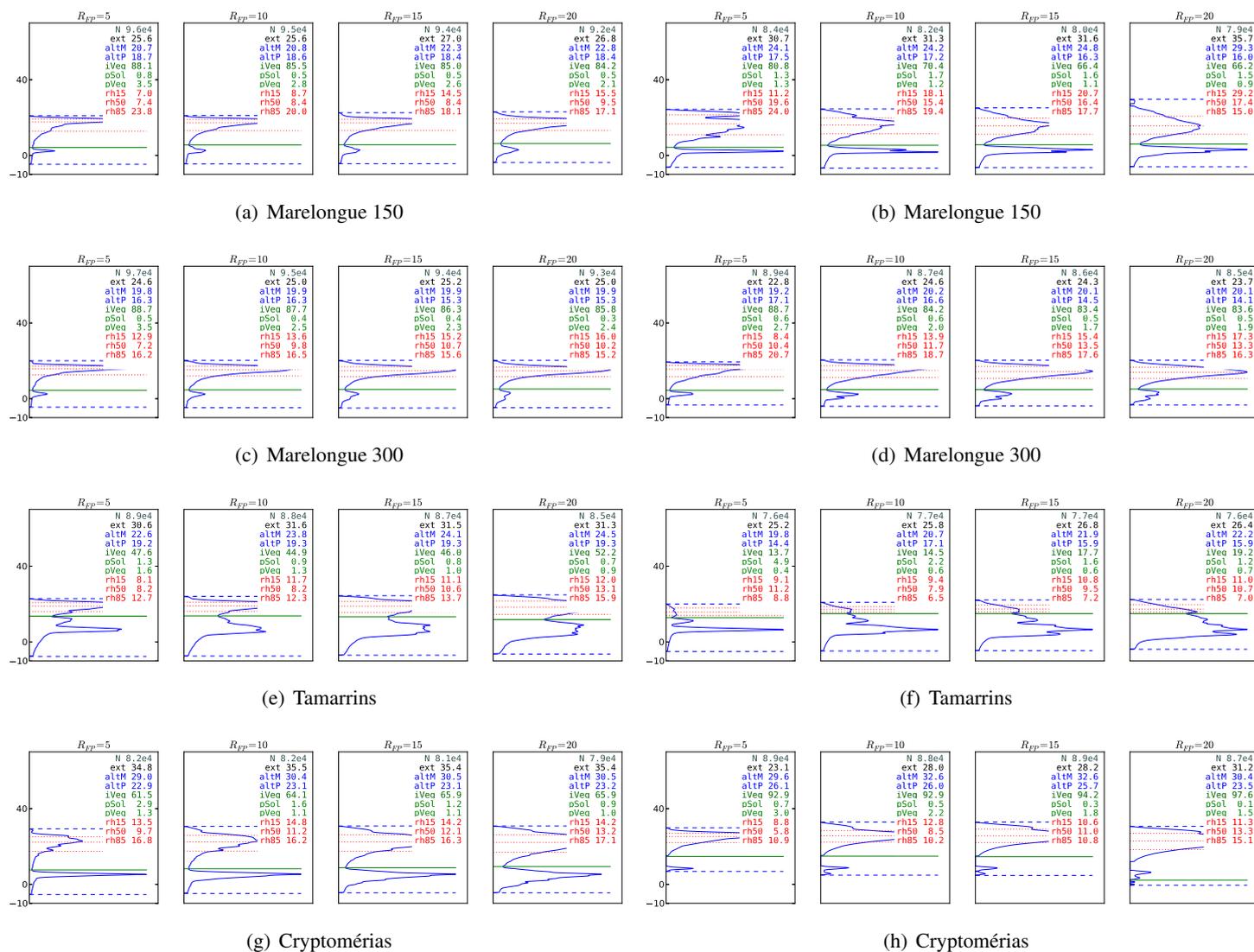


FIGURE 89 – Formes d'ondes simulées sur les 4 placettes en fonction du rayon du footprint (maquettes TLS à gauche et terrain à droite)

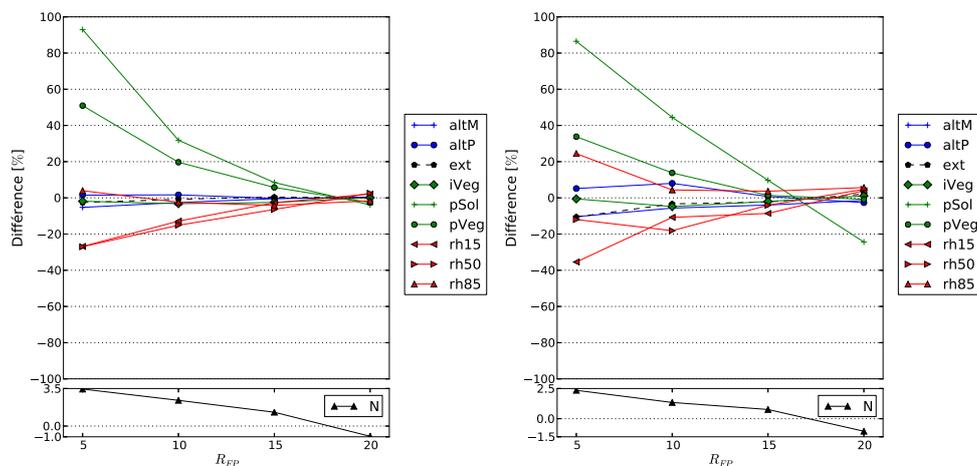
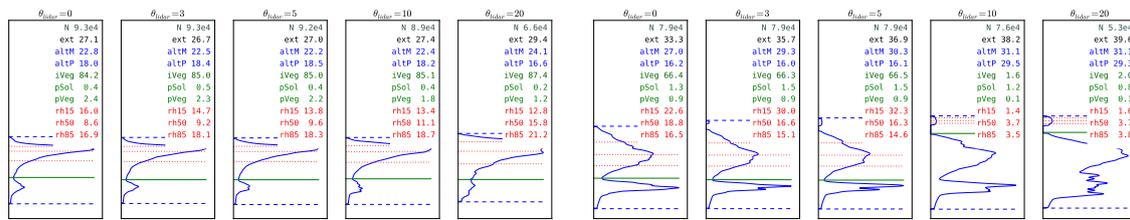


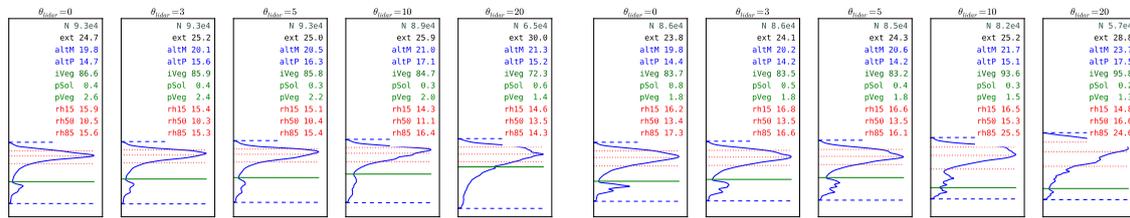
FIGURE 90 – Tendances des métriques en fonction de l'angle d'incidence du Lidar (maquettes TLS à gauche et Terrain à droite)

3.2 Sensibilité à la direction de visée



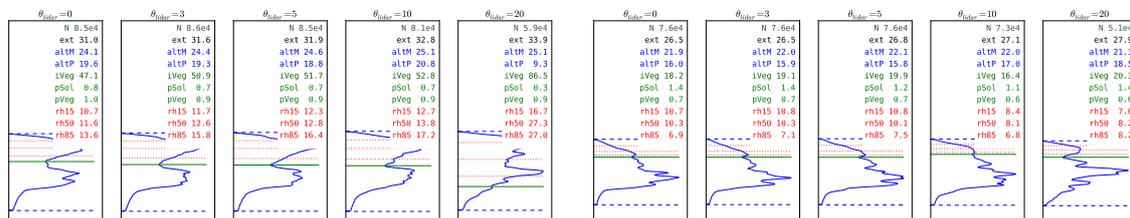
(a) Marelongue 150

(b) Marelongue 150



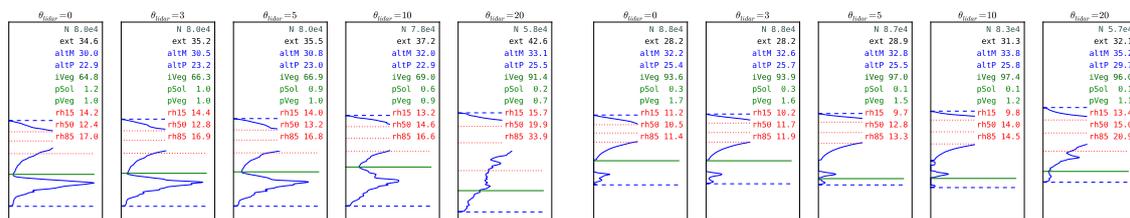
(c) Marelongue 300

(d) Marelongue 300



(e) Tamarrins

(f) Tamarrins



(g) Cryptomérias

(h) Cryptomérias

FIGURE 91 – Formes d'ondes simulées sur les 4 placettes en fonction de l'angle zénithal (maquettes TLS à gauche et terrain à droite)

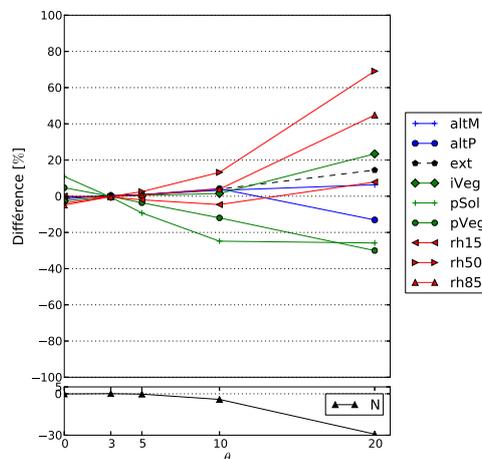
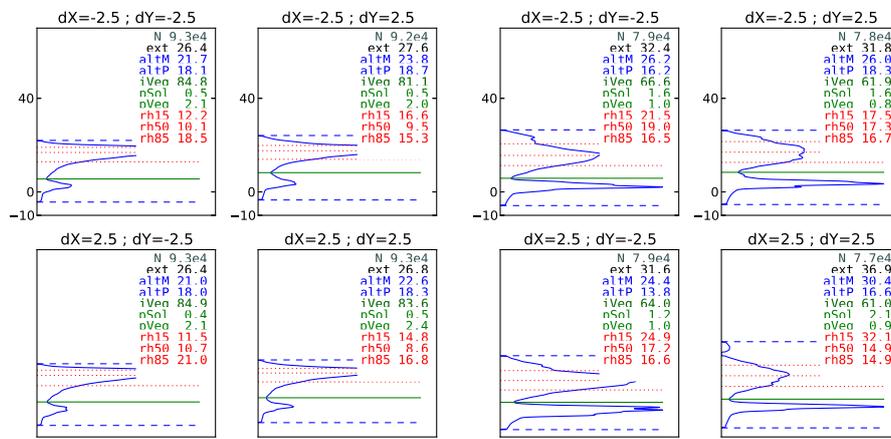


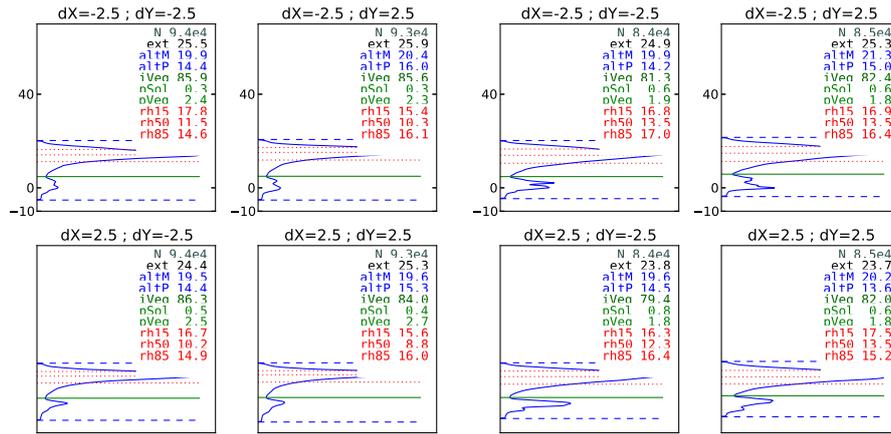
FIGURE 92 – Tendances des métriques en fonction de l'angle d'incidence du Lidar (maquettes TLS)

3.3 Sensibilité à la précision sur la position visée



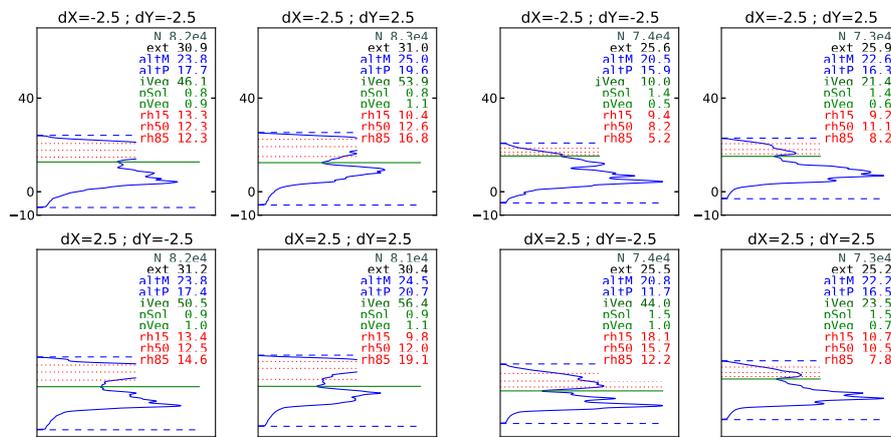
(a) Marelongue 150

(b) Marelongue 150



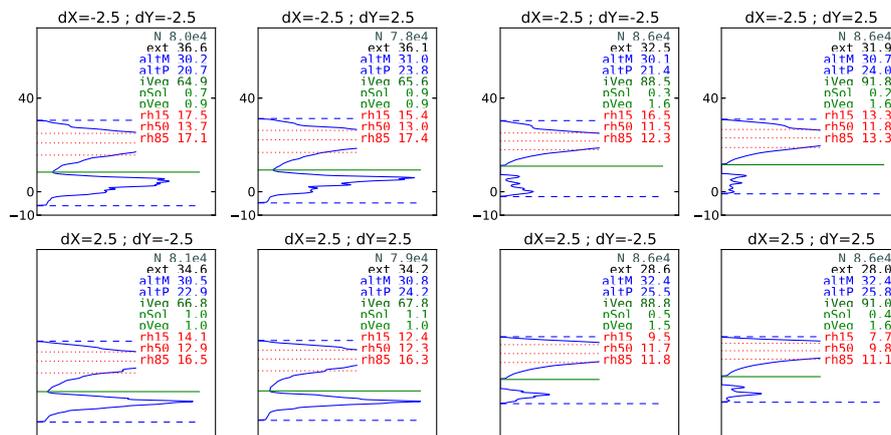
(c) Marelongue 300

(d) Marelongue 300



(e) Tamarrins

(f) Tamarrins



(g) Cryptomérias

(h) Cryptomérias

FIGURE 93 – Formes d'ondes simulées sur les 4 placettes en fonction du jitter (maquettes TLS à gauche et terrain à droite)

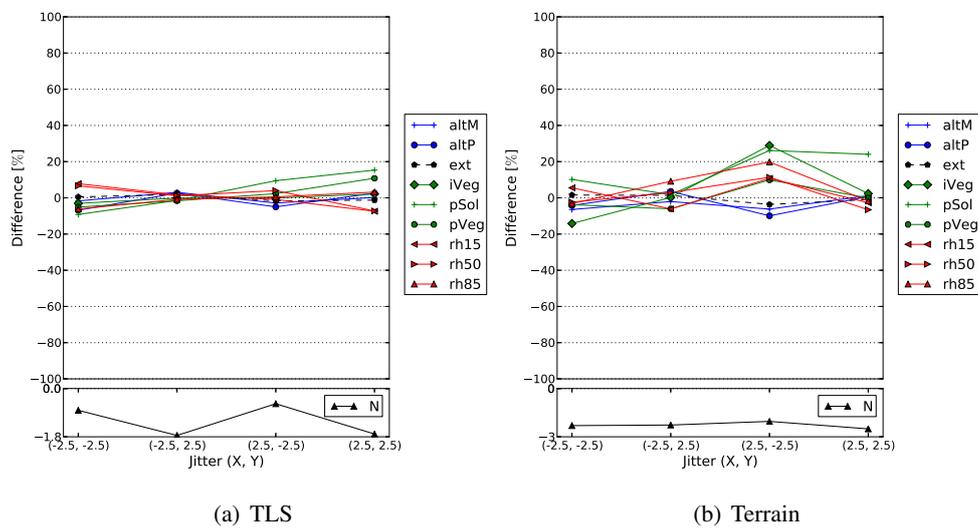


FIGURE 94 – Tendances des métriques en fonction de la position visée (jitter)