

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ESTIMATION DE LA HAUTEUR DE LA BASE DE LA COURONNE VIVANTE AVEC
LIDAR SCANNEUR À RETOURS MULTIPLES

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GÉOGRAPHIE

PAR
MATHIEU LAFORME

AOÛT 2012

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

D'abord, j'aimerais remercier Benoît St-Onge, mon directeur de recherche, pour ses précieux conseils, le soutien qu'il m'a apporté et la confiance qu'il m'a témoigné.

Je remercie également tous les autres membres du Laboratoire de Cartographie des Dynamiques Forestières de l'Université du Québec à Montréal pour avoir partagés avec moi leurs compétences et leurs connaissances et pour m'avoir encouragé à aller de l'avant avec mon projet. Les échanges que j'ai eu avec vous, tant au niveau professionnel que personnel ont été pour moi une grande source d'inspiration et de motivation.

Enfin, je remercie mes parents et amis pour leurs encouragements, leur support sans faille et l'intérêt qu'ils ont porté envers l'avancement de mon travail.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES ÉQUATIONS	ix
RÉSUMÉ	x
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I	
MISE EN CONTEXTE.....	4
1.1 Utilité des mesures sur la couronne	4
1.1.1 Gestion de risque et aménagement.....	5
1.2.2 Études écologiques et environnementales	5
1.2 Télédétection.....	7
1.2.1 Historique du lidar.....	8
1.2.2 Principes de base du lidar.....	9
1.2.3 État général des connaissances.....	12
CHAPITRE II	
PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS.....	15
CHAPITRE III	
REVUE DE LITTÉRATURE.....	17
CHAPITRE IV	
MÉTHODOLOGIE.....	38
4.1 Introduction.....	38
4.2 Zone d'étude	38
4.3 Données de télédétection	39
4.4 Données terrain.....	41
4.5 Extraction des nuages de points.....	42
4.6 Estimation de la hauteur de la base de la couronne	42
4.7 Méthode d'analyse des résultats.....	45

CHAPITRE V	
RÉSULTATS.....	48
5.1 Visualisation des résultats.....	48
5.2 Statistiques descriptives.....	51
5.3 Modélisation.....	54
5.4 Simulations.....	62
 CHAPITRE VI	
DISCUSSION.....	64
 CONCLUSION.....	75
 ANNEXE A	
VISUALISATION DES RETOURS, DU PROFIL DE DENSITÉ, DE L'OBSERVATION TERRAIN ET DE LA MESURE LIDAR (PAR INDIVIDU).....	79
 BIBLIOGRAPHIE.....	92

LISTE DES FIGURES

Figure

1.1	Attributs de la couronne.....	4
3.1	Relation entre mesures terrain et prédictions lidar.	23
3.2a	Division du nuage de point en strate.....	24
3.2b	Résultat du filtre sur le vecteur et hauteur estimée.	24
3.3	Illustration des concepts de strates de hauteur et de voxels.	26
3.4	Exemple d'un profil vertical de hauteur et d'intensité.	27
3.5	Exemple d'ajustement d'une polynomiale à un profil vertical.	28
3.6	Distribution des fréquences relative et distribution de Weibull.....	31
3.7	Différence entre hauteurs de base de la couronne prédites et mesures terrain.....	32
3.8	Illustration du concept de forme alpha en deux dimensions.....	34
3.9	Exemple de forme alpha.	35
4.1	Emplacement de la zone d'étude et des données lidar acquises en 2007, Forêt d'enseignement et de recherche du Lac Duparquet.....	39
5.1	Profil de l'échantillon 936.....	49
5.2	Profil de l'échantillon 737.....	49
5.3	Histogrammes de fréquences des écarts pour tous les individus et par espèce.	53
5.4	Différences entre valeurs attendues et valeurs estimées (par espèce).	54
5.5	Relation entre mesures terrains et estimations avec Lidar.....	55
5.6	Vérification de l'ajustement du modèle.	56
5.7	Profil de l'échantillon 952.....	57
5.8	Profil de l'échantillon 759.....	57

5.9	Relation entre mesures terrains et estimations avec Lidar (excluant les valeurs extrêmes).....	59
5.10	Vérification de l'ajustement du modèle (excluant les valeurs extrêmes).	60
5.11	Résultats des modèles, global et par espèce.	62
5.12	Évaluation plus formelle de l'ajustement du modèle.	63
6.1	Comparaison entre la silhouette d'un pin gris et d'un pin sylvestre.	68

LISTE DES TABLEAUX

Tableau

4.1	Spécifications pour l'acquisition des données lidar.....	40
5.1	Hauteur de la base de la couronne des épinettes blanches.....	50
5.2	Hauteur de la base de la couronne des peupliers faux-trembles	50
5.3	Hauteur de la base de la couronne des pins gris	51
5.4	Statistiques descriptives des écarts entre les mesures terrains et les valeurs obtenues par l'analyse des profils de densité	52
5.5	Biais et écart-type, par espèce	52
5.6	Résultats du modèle linéaire	54
5.7	Biais et erreur type (SE) calculés par <i>bootstrap</i> avec et sans les valeurs extrêmes	58
5.8	Résultats du second modèle linéaire, sans les valeurs extrêmes.....	58
5.9	Résumé des résultats des modèles (global et par espèce).....	61
5.10	Une évaluation plus robuste pour les estimés du modèle	63
6.1	Comparaison entre les résultats présentés et ceux d'autres études.....	65
6.2	Comparaison entre la densité de retours utilisée et celles des autres études avec lesquelles les résultats sont comparés	65

LISTE DES ÉQUATIONS

Équation

4.1	Estimation de la densité.....	44
4.2	Valeur du paramètre K	44

RÉSUMÉ

Au cours des dernières années, on a assisté à un virage vers une gestion plus durable de la forêt publique et des ressources forestières. Pour ce faire, il est nécessaire d'acquérir des informations précises sur le statut des forêts. Ceci permettra d'une part, de mieux évaluer les ressources disponibles et, d'autre part, de faire un meilleur suivi de leur dynamique afin, par exemple, de mieux comprendre et de prévoir les impacts de l'activité sylvicole. Il a été démontré que les capteurs lidars pouvaient être utilisés afin d'obtenir des données pouvant être segmentées afin de décrire assez fidèlement la géométrie de la couronne d'arbres individuels. Parmi les attributs de la forêt pouvant être extraits de ces données, la hauteur de la base de la couronne vivante est probablement un de ceux pour lequel le potentiel du lidar a été le moins étudié et ce, malgré l'importance que la connaissance de ce paramètre peut avoir pour, par exemple, le calcul de la biomasse ou la prévention des feux de forêts.

Une nouvelle méthode permettant d'estimer la hauteur de la couronne vivante à partir de données lidar est proposée. Les données utilisées pour la recherche ont été acquises au Québec, sur le territoire de la forêt d'enseignement et de recherche du Lac Duparquet. Les trois espèces à l'étude sont le peuplier faux-tremble, l'épinette blanche et le pin gris. L'appareil lidar utilisé pour acquérir les données est un capteur ALTM3100 de Optech permettant l'enregistrement des premiers et derniers retours, ainsi que jusqu'à deux retours intermédiaires. La méthode présentée a donné un biais de -1.37 mètres et une erreur type de 2.36 mètres. Ces résultats sont comparables à ceux obtenus par d'autres auteurs et semblent confirmer leur observation que le lidar a tendance à surestimer la hauteur de la base de la couronne. Il est noté que cette tendance à surestimer la mesure n'est pas systématique; elle semble se manifester différemment selon l'espèce. Des hypothèses concernant les différentes variables pouvant affecter la précision des mesures sont avancées. Des pistes pour mieux évaluer leur effet respectif ainsi que deux méthodes pouvant être utilisées pour améliorer l'exactitude et la précision des estimés sont proposées.

INTRODUCTION

À l'échelle mondiale, les forêts représentent une ressource naturelle, économique et environnementale de première importance. Elles fournissent le matériel nécessaire à la production de nombreux produits de consommation, elles constituent une part significative de la biodiversité et elles rendent de nombreux services environnementaux (stockage du carbone, protection des sols contre l'érosion). Cependant, les forêts mondiales subissent une pression grandissante résultant de l'activité humaine, la destruction des écosystèmes s'accélère et les ressources se raréfient (Myers, 1996).

La forêt publique québécoise n'échappe pas à ce phénomène, nous assistons actuellement à une surexploitation de nos ressources forestières et l'équilibre de nos écosystèmes pourrait être compromis (Commission d'étude sur la gestion de la forêt publique québécoise, 2004). Pour assurer le maintien du rôle écologique de la forêt et sa durabilité en tant que ressource naturelle, développer de nouvelles façons de l'utiliser, de l'aménager et de la protéger apparaît comme une nécessité. Les modifications apportées à la législation québécoise en 2005 (baisse de la possibilité forestière) et les nouveaux objectifs et orientations du régime forestier, publiés en 2008 dans le « livre vert », témoignent de la volonté du gouvernement québécois d'agir en ce sens (Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune (MRNF), 2008¹). Pour y arriver, il faudra cependant acquérir des informations précises sur le statut des forêts, et ce, à des échelles spatiales allant du local au global (Boyd et Danson, 2005).

De plus, la forêt est un milieu dynamique et sa structure évolue constamment. Son état à un moment précis dépend, entre autres, de la composition d'espèces, des modalités de croissance de ces espèces, du stade de développement des plantes, de la saison, des conditions écologiques (topographie, qualité du sol, drainage) et de l'historique des différentes

perturbations (feux, chablis, insectes, maladies, pratiques d'aménagement) (Brack, 2000; Jonckheere *et al.*, 2004). Ainsi, pour que la collecte d'information sur le statut de la forêt soit réellement utile, il est nécessaire de pouvoir réitérer sur une base régulière.

Dans les pratiques forestières canadiennes et québécoises, la structure de la canopée forestière est surtout représentée par deux approches soit : des points discrets (réseaux de placettes d'échantillonnage) et des cartes thématiques en deux dimensions représentant l'étendue et la nature des peuplements (MRNF, 2006; Ressources Naturelles Canada (RNC), 2008).

Les placettes d'échantillonnage sont généralement utilisées pour suivre les changements physiques, dendrométriques et écologiques des composantes forestières. Des mesures y sont prises périodiquement (tous les dix ans, environ) et sont comparées aux mesures prises antérieurement, aux mêmes endroits et sur les mêmes variables (MRNF, 2006). Cependant, ces méthodes de mesure de la végétation « *in situ* » demandent énormément de temps et sont coûteuses. De plus, puisque les milieux forestiers présentent une grande variabilité spatiale et différentes associations d'espèce et d'âge, il est très laborieux de décrire leur structure avec cette méthode.

Quant aux cartes, elles sont utilisées pour la planification des activités d'aménagement forestier à un niveau global (Bérard et Côté, 1996). Toutefois, elles sont souvent trop généralisées et/ou trop imprécises pour planifier des activités à une échelle plus fine ou pour les études environnementales. Les données qu'elles contiennent sont obtenues par l'interprétation de photos aériennes effectuée par des experts entraînés.

Bien que ces deux approches fournissent des données pertinentes, les méthodes d'analyse actuelles tendent à utiliser l'une ou l'autre. Grâce aux outils de télédétection développés récemment (méthodes et capteurs) nous pouvons envisager d'intégrer ces deux types de mesures en proposant une cartographie à l'arbre près. En effet, il existe un réel potentiel de faire une description détaillée de la structure forestière en se basant sur des informations provenant d'arbres individuels (Jupp, 2007). L'extraction des données nécessite toutefois une

automatisation, car les processus d'interprétation « manuelle » demandent temps, expertise et investissements.

Développer des méthodes automatisées permettant l'extraction d'information sur les attributs des arbres individuels permettra de construire des jeux de données qui, si les attributs mesurés sont bien choisis, pourront être utilisés pour la modélisation et pour la réalisation de plusieurs cartes (hauteur de la canopée, biomasse, combustible, volume de bois). En plus de pouvoir être réactualisées facilement, ces cartes auront le potentiel d'aider directement et indirectement à la prise de décisions pour une gestion des ressources forestières plus durable. Directement parce qu'elles pourront mieux représenter le statut de la ressource à un moment précis que les cartes traditionnelles. Indirectement puisqu'elles comporteront informations plus précises, elles auront une plus grande utilité pour la recherche scientifique sur, par exemple, les dynamiques du milieu forestier ou la biodiversité.

CHAPITRE I

MISE EN CONTEXTE

1.1 Utilité des mesures sur la couronne

Parmi les attributs forestiers pouvant être mesurés, ceux permettant de décrire la couronne de l'arbre revêtent une importance particulière. Par définition, la couronne est la partie aérienne de l'arbre, elle inclut les branches et le feuillage. Les paramètres de la couronne généralement évalués sont la forme, la longueur (ou hauteur de la base), le diamètre, l'aire couverte, le volume et la surface foliaire (Brack, 2000) (Figure 1.1). Comme nous allons le démontrer dans les lignes qui suivent, les mesures de la couronne sont très utiles pour la gestion des risques, l'aménagement et pour les études écologiques et environnementales.

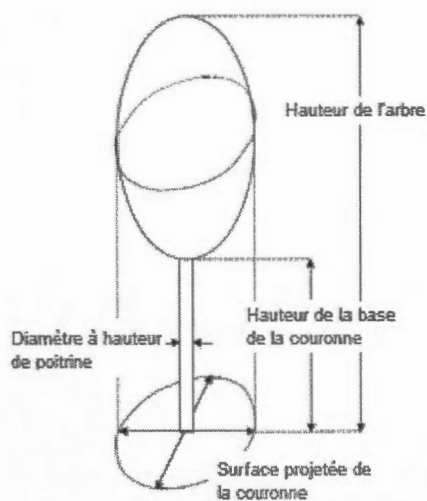


Figure 1.1 Attributs de la couronne
Source: Traduit de Riaño *et al.*, 2004

1.1.1 Gestion de risque et aménagement

Parmi les perturbations pouvant survenir en forêt boréale, les feux occupent une place prépondérante puisque d'une part, ils peuvent survenir n'importe où sur le territoire et, d'autre part, ils peuvent constituer une menace considérable pour la sécurité de la population. Au Québec, afin de maintenir et d'améliorer l'état et la productivité des écosystèmes forestiers et d'assurer la sécurité du public, le ministère des ressources naturelles et de la faune a donc élaboré une politique de gestion du feu (MRNF, 2010). Or, pour bien évaluer les risques de feux, il est nécessaire de tenir compte de plusieurs paramètres de la structure forestière. Entre autres, la continuité verticale et horizontale de la canopée, la densité (individu par unité de surface et densité du feuillage), la proximité horizontale des couronnes et la distance entre la base des couronnes et le sol (ou la végétation sous couvert) (Riaño et al., 2003).

Ensuite, la connaissance de paramètres tels que la hauteur (moyenne ou totale) des individus et la longueur des couronnes (totale ou relative à la hauteur des arbres) est particulièrement importante si l'on veut estimer, par des équations allométriques, la quantité et la qualité du bois disponible pour la récolte (Naesset et Økland, 2002). Pouvoir estimer le volume de feuilles présente également un grand intérêt pour les calculs de biomasse. En effet, pour une plus grande exactitude, il est préférable de calculer la biomasse en faisant la somme du volume des parties individuelles de l'arbre, soit la tige, les branches et les feuilles (Lambert, 2005). En d'autres mots, il faut estimer le volume et calculer la biomasse séparément pour chacune d'entre elles.

Finalement, la forme et la taille de la couronne présentent un intérêt en foresterie urbaine, car elles jouent un rôle important sur l'impact visuel de l'arbre.

1.2.2 Études écologiques et environnementales

Estimer plus précisément le volume des feuilles des arbres présente un grand intérêt pour les biologistes et autres scientifiques s'intéressant à la forêt. Par le biais de la photosynthèse, les

feuilles constituent les principales surfaces permettant les échanges de gaz, d'énergie et d'eau entre la végétation et l'atmosphère. En effet, les caractéristiques physiques et physiologiques des feuilles en font les principaux récepteurs du rayonnement solaire et les appareils de photosynthèse les plus efficaces chez les plantes (elles sont responsables de 60 à 95% de l'activité de photosynthèse). Par ailleurs, la taille de la feuille, sa surface foliaire, est directement reliée à son potentiel photosynthétique (Ross, 1981).

La distribution et la densité du feuillage jouent un rôle majeur dans la luminosité, la température et l'humidité sous et à l'intérieur de la canopée (Spurr et Barnes, 1980; Ross, 1981; Breuer et Frede 2003). Cela dit, évaluer la quantité (surface, masse) et la distribution des tissus foliaires est d'une importance capitale pour la compréhension des processus et pour toute modélisation concernant le rayonnement solaire (lumière disponible) ou les échanges entre l'écosystème et l'atmosphère (d'eau, de gaz, d'énergie). Aussi, la distribution, la surface (largeur, longueur, épaisseur), les propriétés optiques et l'orientation des feuilles sont les caractéristiques de la canopée qui sont les plus aptes et les plus susceptibles de s'adapter rapidement à des changements du milieu (en relation avec la compétition pour la lumière, l'humidité, les nutriments, les perturbations naturelles et la phénologie) (Ross, 1981; Weiss *et al.*, 2004). Inversement, des changements au niveau des caractéristiques du feuillage ou de la morphologie de la couronne pourraient donc constituer un indicateur de changements ou de perturbations dans l'écosystème.

De plus, la plupart des nutriments prélevés par les végétaux s'accumulent plus fortement dans les feuilles que dans les autres parties de la plante (Bérard et Côté, 1996). Ainsi, pouvoir évaluer séparément les quantités de tissus pourrait s'avérer intéressant pour, par exemple, estimer les quantités de nutriments stockés par les arbres d'un peuplement et tenter de quantifier les effets de la récolte d'arbres entiers sur l'exportation de nutriments.

Enfin, il a été démontré que le potentiel de productivité d'un peuplement est fortement corrélé avec sa capacité à intercepter le rayonnement solaire. Cette capacité d'interception est directement liée avec la production, la durée de vie et la distribution des feuilles. Ainsi, la

production de feuilles est l'un des facteurs les plus importants à considérer pour déterminer la productivité potentielle du site sur lequel se trouve le peuplement (Albaugh, 1998).

1.2 Télédétection

Dès l'acquisition des premières images aériennes, le potentiel de la télédétection pour l'évaluation des ressources et la cartographie forestière a provoqué l'intérêt de la communauté œuvrant en foresterie (Estes et Hemphill, 2005). Aujourd'hui, l'utilisation des photos aériennes pour l'évaluation, l'inventaire et la gestion des ressources est devenue courante (Spurr, 1948; Hall, 2003), le milieu de la recherche en télédétection forestière est toujours très actif et les applications de cette discipline se multiplient.

Le maintien de l'intérêt manifesté à l'égard de la télédétection se comprend par le fait que les outils développés répondent à deux besoins particuliers de l'industrie et des scientifiques soit : développer des moyens de collecte de données moins onéreux, donc offrant un meilleur rapport coût/superficie et obtenir des données plus exactes et/ou plus précises (Zagalikis *et al.*, 2005). Les développements technologiques suscités par la poursuite de ces objectifs ont favorisé l'apparition de meilleurs et de nouveaux capteurs ainsi que le raffinement des techniques d'extraction et d'analyse de l'information. Des logiciels permettant de traiter l'information géographique plus performants, des ordinateurs plus puissants ainsi que le perfectionnement des systèmes GPS et des centrales inertielles permettent une réduction considérable du délai entre l'acquisition des données, leur analyse et leur transformation en produits utiles (ex. : cartes).

De plus, notre compréhension grandissante du milieu naturel et l'apparition de régimes forestiers plus flexibles permettent également de mieux mettre à profit les outils de télédétection développés (Wulder, 2003). Par exemple, dans la mise à jour du régime forestier québécois réalisée en 2001, on reconnaît l'importance de protéger les écosystèmes sensibles. On prévoit donc la possibilité d'imposer des normes d'intervention différentes de celles prévues dans la réglementation afin d'accorder une meilleure protection à ces territoires (MRNF, 2008²). La télédétection permet d'acquérir les données nécessaires à la

cartographie de ces milieux et de planifier les activités forestières de façon à respecter ces nouvelles orientations.

En somme, au cours des dernières années, les outils et les méthodes de télédétection ont connu de nombreuses avancées et l'utilité, pour la science et l'industrie forestière, de données acquises par des méthodes autres que la photo aérienne est devenue plus en plus apparente. Par exemple, les rapides avancées réalisées par la technologie lidar au cours des vingt dernières années nous permettent d'anticiper qu'elle pourrait bientôt s'imposer comme un outil efficace et rapide pour réaliser les inventaires forestiers (Leeuwen et Nieuwenhuis, 2010). Le développement récent d'appareil lidar multi retours et à échantillonnage d'amplitude (« *scanning full waveform lidar* » ou « *scanning waveform digitization lidar* ») lui ouvre encore de nouvelles possibilités. Cela dit, nous consacrerons les prochaines lignes à un exposé de l'état des connaissances sur le lidar.

1.2.1 Historique du lidar

Le terme lidar est un acronyme provenant de l'anglais « **light detection and ranging** ». Dans la littérature francophone, on utilise parfois l'expression « altimétrie laser » (St-Onge, 2004). Les capteurs lidar peuvent être classifiés selon plusieurs critères. D'abord, on peut les classer selon deux grands groupes soit les appareils profileurs et les appareils à balayage, ou lidar scanners. Ensuite, les mesures prises par l'un ou l'autre de ces groupes peuvent être enregistrées de façon discrète ou continue ("*full waveform*"). Enfin, la taille de la trace au sol (empreinte lumineuse) peut varier grandement, on la qualifie généralement de petite lorsqu'elle est inférieure à un mètre ou de grande, si elle est supérieure à un mètre.

On s'intéresse aux applications de la technologie lidar pour la bathymétrie et la topographie depuis les années 1960 et aux applications forestières depuis les années 1970. Avant les années 1990, les lidars étaient essentiellement des profileurs. Ces appareils produisent une trace au sol (« ligne ») et on les employait pour mesurer des transecs (coupe topographique). Avant l'avènement de la technologie GPS, établir la localisation précise de la trace au sol pouvait cependant s'avérer difficile (Jupp, 2007).

Au début des années 1990, l'achèvement du système GPS et l'amélioration du couplage entre les appareils GPS de bord et les centrales inertielles (INS) ont permis une utilisation des lidars scanneurs développés par la NASA, l'institut de photogrammétrie de l'Université de Stuttgart et l'industrie privée au cours des années 1980 (St-Onge, 2004). Les premiers lidars scanneurs ne pouvaient collecter qu'un seul retour (un point 3D) par impulsion. Aujourd'hui, tous les systèmes lidars peuvent enregistrer simultanément les premiers et derniers retours, certains peuvent même enregistrer des retours intermédiaires, prendre simultanément des photos aériennes ou enregistrer l'onde complète du retour (Hyypä *et al.*, 2004).

1.2.2 Principes de base du lidar

Un capteur lidar comporte deux composantes de base soit un émetteur laser et un récepteur (téléscope). Des impulsions lumineuses à faible divergence, dans le spectre du proche infrarouge (un laser) sont émises par l'appareil en direction de la surface à analyser avec une fréquence pouvant atteindre 160 kHz. Dans le cas des capteurs à balayage, les impulsions sont dirigées par un miroir de balayage. Pour chaque impulsion, l'angle de ce dernier est mesuré à l'aide d'un galvanomètre et enregistré. Lorsque le rayon est intercepté par un objet (cible), un retour d'énergie lumineuse est provoqué. Une partie de cette énergie est captée par le récepteur et les temps d'émission et de retour, mesurés grâce à un oscilloscope à haute fréquence, sont enregistrés. Puisque la vitesse de la lumière est connue, il est alors possible de mesurer la portée, soit la distance entre le capteur et la surface visée. La portée est égale au temps de parcours multiplié par la vitesse de la lumière (environ 0,3 mètre/nanoseconde), divisé par deux (puisque l'on a un aller-retour) ($\text{Distance} = (\text{Vitesse de la lumière} * \text{temps de parcours}) / 2$)

Pour chaque impulsion, le retour d'énergie lumineuse peut être représenté par une onde montrant la variation dans le temps de son intensité. La complexité de cette onde dépend de la surface ayant provoqué le retour. Les surfaces simples provoquent des pics d'amplitude uniques alors que les surfaces complexes (ex : végétation) peuvent générer des ondes de retour complexes. L'amplitude du signal de retour dépend de nombreux paramètres soit : la

puissance du laser, les propriétés de la cible, les conditions atmosphériques et la distance de la cible. Il a été démontré que l'onde de retour peut être modélisée adéquatement par une somme d'équations Gaussiennes (Wagner *et al.*, 2006). Cependant, selon l'application désirée et la cible, la somme de gaussiennes n'est pas nécessairement la façon la plus précise de modéliser l'onde. Il pourrait être préférable d'utiliser, selon les cas, des fonctions gaussiennes, lognormales ou gaussiennes généralisées (Chauve *et al.*, 2007). Généralement, on souhaite décomposer l'onde de retour (isoler les pics d'intensité) afin d'obtenir des retours distincts.

Dans le cas des lidars discrets, un dispositif électronique permet d'isoler automatiquement les différents retours, pendant l'acquisition. Les temps des premiers et des derniers retours sont enregistrés par l'appareil. Parfois, un certain nombre de retours intermédiaires peuvent aussi être enregistrés. Le temps d'un premier retour correspond à la première montée de signal au-dessus du niveau du bruit. Quant au dernier retour, son temps correspond au dernier pic du signal au-dessus du niveau du bruit, juste avant l'extinction du signal résultant de la réflexion sur une surface opaque (le sol par exemple). Les premiers retours correspondent donc aux surfaces visibles du haut des airs (tel que la végétation) alors que les derniers retours peuvent être associés au niveau du sol, à des sous-étages de la végétation ou à divers artefacts reposant sur le sol (ex : arbres morts, véhicules, constructions) (St-Onge *et al.*, 2003). Il existe différents algorithmes permettant de classifier les derniers retours afin de séparer les véritables retours sol de ceux provenant des sous-étages (Hyypä *et al.*, 2004).

Pour ce qui est des capteurs à onde complète, ils sont capables d'enregistrer et de numériser entièrement le signal de chaque retour (Nordin, 2006; Chauve *et al.*, 2007). En fait, ils procèdent à un échantillonnage très dense de l'amplitude du signal en fonction du temps. Les différents concepteurs de convertisseur analogique-numérique (« digitizer ») ont élaboré des stratégies permettant de limiter le volume de données enregistrées. Par exemple, dans le cas du convertisseur ALTM de Optech, l'onde est échantillonnée pour chaque retour à un intervalle d'une nanoseconde. L'enregistrement de l'onde débute lorsque le signal dépasse un certain seuil (bruit) et se poursuit sur une durée maximale de 440 nanosecondes (on enregistre donc à partir du premier retour). Pour chaque nanoseconde, le signal est codé sur 8

bits. Une valeur allant de 0 à 255 est donc enregistrée (Optech 2007). Grâce aux valeurs enregistrées, les ondes de chacun des retours peuvent être modélisées et les temps des différents retours (correspondant à des pics d'intensité) peuvent être extraits. La forme des retours pourrait également être utilisée pour aider à classifier les données (Wagner *et al.*, 2004). Il est important de préciser que l'onde d'un retour est une convolution de l'onde de l'impulsion laser (elle même une gaussienne assez étendue) et de l'objet interceptant l'impulsion. Un des avantages qu'apporte l'utilisation de ce type de données est une augmentation du contrôle de l'utilisateur sur le processus d'interprétation des mesures.

Pour déterminer précisément la position (X, Y, Z) au sol des retours, il est essentiel de connaître, pour chacun d'entre eux, l'origine (temps et position) et la direction de l'impulsion ainsi que l'angle du miroir de balayage. Des données très précises provenant d'un système GPS (avec correction différentielle) et d'une centrale inertielle (INS) installés sur la plateforme (aéronef) sont essentielles. Des corrections relatives à la longueur physique des instruments optiques, aux angles d'installation de l'INS, à la température et à la pression atmosphérique ainsi qu'au délai temporel imposé par le câblage séparant les différentes composantes du lidar doivent aussi être appliquées (Friess, 2007; Duncan, 2008). Ces différents paramètres sont intégrés dans un modèle mathématique (équation) permettant de géoréférencer les retours. Une fois traitées, les données collectées prennent la forme d'un semis de points (X, Y, Z) plus ou moins régulier.

Pour le calibrage et la vérification des résultats, des données collectées sur le terrain (ex : GPS différentiel, arpentage) sont nécessaires. Cependant, puisque la correspondance exacte entre un retour lidar et un point de contrôle au sol est inopinée, les données lidar doivent être interpolées afin que l'erreur puisse être évaluée. On peut par exemple calculer les RMS (« *root mean square error* ») entre des points de contrôle pris sur le terrain et une surface (Modèle numérique de surface par exemple) générée avec les données lidar (Friess, 2007).

Grâce au développement de nouvelles technologies, l'incertitude des mesures d'altitude lidar tend à diminuer, car les mesures de portée et de positionnement sont de plus en plus exactes. Les mesures de portée lidar sont généralement très précises et l'erreur se situe habituellement

à moins de 15 centimètres pour une distance de 1000 mètres, avec une résolution d'un centimètre (St-Onge, 2007). L'évaluation de la distance peut-être affectée par la poussière et la vapeur. Elle peut parfois être rendue imprécise ou invalide par une forte réflexion des rayons solaires. Rarement, des objets avec une réflectance très faible ne renvoient pas un signal suffisamment puissant pour être considéré comme valide par le capteur (Optech, 2006). Quant à la mesure globale de position, elle peut atteindre une incertitude de 2 centimètres et les fournisseurs garantissent souvent une incertitude ne dépassant pas 15 centimètres. Dans le cas de modèle de terrain sous couvert forestier, on peut cependant attendre une incertitude verticale de l'ordre de 30 centimètres puisque la densité de points atteignant le sol est plus faible et que les erreurs de classification sont plus fréquentes (St-Onge, 2007).

Dans le cas des lidars discrets, le prétraitement des données est généralement effectué par le fournisseur et les données sont livrées au client dans un format d'échange prédéfini (soit le LAS ou un format propriétaire, propre au fournisseur). Dans le cas des appareils à échantillonnage d'amplitude, des fichiers de données brutes, contenant toutes les informations nécessaires pour le traitement des données, sont envoyés au client.

1.2.3 État général des connaissances

Il a été établi que la technologie lidar à petite empreinte pouvait être utilisée pour cartographier efficacement la surface terrestre en trois dimensions, même sous le couvert forestier (les impulsions laser à haute intensité pénètrent souvent le couvert et atteignent le sol). Son utilisation pour la topographie est maintenant courante. Les recherches menées au cours des vingt dernières années ont également démontré que les données lidar pouvaient nous renseigner autant sur la structure verticale que sur la structure horizontale de la forêt. Plusieurs méthodes d'extraction d'attributs utiles à l'aménagement forestier ont été développées et sont maintenant opérationnelles (Rombout, 2007; Holmgren *et al.*, 2008; Leeuwen et Nieuwenhuis, 2010). Par exemple, des chercheurs ont démontré que les données lidar pouvaient être utilisées afin d'estimer précisément plusieurs paramètres forestiers à l'échelle du peuplement (ou sur une superficie) en construisant des modèles basés sur

différents indicateurs (quantile ou percentile, coefficient de variation, hauteur médiane, hauteur moyenne, hauteur maximale, densité) dérivés de la distribution des retours (Naesset et Gobakken, 2005; Roberts *et al.* 2007). D'autres ont démontré que les données lidar pourraient être utilisées pour effectuer des mesures sur des arbres individuels, c'est-à-dire segmenter la canopée forestière (isoler et localiser les arbres) et mesurer les paramètres pour chacun des individus (Persson *et al.*, 2002; Lim *et al.*, 2003; Maltamo *et al.*, 2004; Reitberger, 2009 ;).

Si plusieurs études démontrent que l'altimétrie laser présente un bon potentiel pour étudier la structure de la forêt en trois dimensions (Chasmer *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2004), les données provenant de capteurs lidars aéroportés comportent toutefois leurs propres limites. Chasmer *et al.* (2004) ont comparé des données provenant de lidar terrestre et aérien. Ils ont remarqué que les tirs effectués depuis une plate-forme aéroportée atteignent rarement le sol et les strates de végétation les plus basses (moyenne de la profondeur atteinte lors de leur expérience : quatre mètres, à partir du sol). La végétation se trouvant dans les sous étages et au niveau du sol (régénération, érables à épis) est donc moins bien représentée par les données. La capacité de pénétration du lidar dépend des espèces présentes et de la structure du couvert.

Pour ce qui est des lidars à échantillonnage d'amplitude, l'analyse de l'onde de retour permet d'une part, de densifier les mesures discrètes (points 3D) et, d'autre part, d'étudier la forme de l'onde retournée par la canopée. Par conséquent, il permet de mieux distinguer les strates de végétation les plus basses et de mesurer plus précisément la canopée (ex : hauteur ou longueur des couronnes) que les appareils conventionnels (ne permettant l'enregistrement que du premier et dernier retour) (Todd *et al.*, 2003; Chauve *et al.*, 2007). Cette capacité d'extraire plus de points pourrait également faciliter la détection de formes et de caractéristiques propres aux objets. Elle apporte des informations détaillées sur la structure des arbres et par conséquent, elle présente un grand potentiel pour améliorer les résultats de classification par espèce (Persson *et al.*, 2005; Litkey *et al.*, 2007; Reitberger *et al.*, 2007). La densification du nuage de points peut être utilisée pour améliorer les opérations de

segmentation (délimitation des couronnes en 3D) et la détection d'arbres individuels (Reitberger *et al.*, 2008).

Néanmoins, nous n'avons pas encore une bonne compréhension de la réponse de l'onde selon les différentes cibles (Ducic *et al.*, 2006; Wagner *et al.*, 2006). Pour interpréter les ondes de retour, une compréhension fondamentale du milieu dans lequel le signal lumineux évolue et de comment celui-ci interagit avec différentes surfaces est nécessaire (Jutzi et Stilla, 2006). Des algorithmes permettant de décrire les retours par des paramètres tels que l'amplitude et l'écart type de l'étendue ("*width*") ont donc été élaborés (Persson *et al.*, 2005; Ducic *et al.*, 2006; Wagner *et al.*, 2006). Il a été constaté que l'écart type de l'étendue du pic d'amplitude associé à un retour pouvait être utilisé avec succès pour détecter le couvert végétal (les surfaces lisses génèrent des pics d'amplitude plus étroits que les surfaces rugueuses). Quant à l'amplitude des retours, elle dépend de nombreux facteurs soit : les caractéristiques de l'impulsion de départ, la fraction de l'impulsion ayant été interceptée par une surface, la réflectance de cette surface pour la longueur d'onde du laser et la fraction de l'énergie retransmise en direction du capteur (Nordin, 2006). Cependant, les influences de la géométrie et de la radiométrie de la cible n'ont pas encore été décorréliées. Il est à ce jour encore impossible d'isoler leurs effets respectifs sur les caractéristiques du signal de retour.

CHAPITRE II

PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

Comme nous l'avons soulevé au chapitre précédent, le gouvernement québécois a récemment pris la décision de se tourner vers une gestion plus durable de ses ressources forestières. Pour atteindre les objectifs qu'il s'est fixés, il faudra cependant acquérir des informations précises sur le statut des forêts. Les méthodes de collecte de données et la cartographie forestière traditionnelles ne semblent pas suffisantes pour répondre correctement à ce besoin. Des cartes davantage détaillées et actualisées plus fréquemment seraient utiles comme outils pour l'aide à la prise de décision et pour la recherche scientifique sur les dynamiques forestières. L'obtention de données décrivant la structure de la canopée forestière, à l'échelle de l'arbre individuel (mesure sur les couronnes) serait un atout non négligeable pour la réalisation de ces cartes. Des études récentes suggèrent que le traitement de données lidar pourrait nous renseigner sur la structure verticale de la forêt et nous permettre d'obtenir des estimations précises, à l'arbre près, pour plusieurs attributs forestiers.

Parmi les attributs pouvant être estimés avec le lidar, la mesure de la hauteur de la base de la couronne (permettant de calculer la longueur de la couronne vivante) est probablement un de ceux ayant été le moins étudié. En effet, peu de publications scientifiques sont consacrées exclusivement à l'évaluation de la performance du lidar pour ce qui est de la mesure de ce paramètre. De plus, la plupart des recherches publiées sur le sujet ont été effectuées sur des milieux contrôlés (plantations monospécifiques, arboretums) ou dans des forêts du nord de l'Europe. En d'autres mots, ces contextes sont assez différents de la forêt boréale québécoise. Pour plusieurs de ces études, seuls les premiers retours lidars sont utilisés afin d'estimer la hauteur de la base de la couronne. Bien que leur potentiel réel reste encore à déterminer, on

présume que les données issues d'appareils permettant d'obtenir des retours multiples pourraient aider à obtenir des estimations plus exactes pour ce paramètre. En effet, puisqu'ils permettent l'extraction d'un plus grand nombre de retours par impulsion, on s'attend à ce que les données reflètent mieux la structure verticale de la canopée et à ce que l'occurrence des retours sur les branches les plus basses soit augmentée.

Dans ce contexte, l'objectif de cette recherche est:

Estimer la hauteur de la base de la couronne vivante d'arbres individuels de la forêt québécoise à l'aide de données lidar obtenues grâce à un capteur permettant l'enregistrement de retours multiples.

Les objectifs spécifiques sont:

- Proposer une méthode permettant d'estimer la hauteur de la base de la couronne vivante en exploitant les données lidar.
- Évaluer la performance de cette méthode dans une forêt mixte naturelle du sud de la zone boréale et comparer les résultats obtenus avec ceux publiés par d'autres chercheurs.

CHAPITRE III

REVUE DE LITTÉRATURE

La longueur de la couronne d'un arbre est la distance entre son apex et la base de sa couronne, le long de son axe principal. Il existe deux définitions courantes pour la base de la couronne. D'une part, on peut considérer que la base de la couronne est définie par la plus basse branche vivante faisant partie de la canopée. D'autre part, on peut la définir plus simplement par la plus basse branche vivante, excluant les bourgeons épicorniques. L'une ou l'autre des deux définitions sera utilisée, selon les besoins. La longueur de la couronne est souvent exprimée comme un ratio (longueur de la couronne/hauteur totale) ou par un pourcentage (% de la couronne vivante). Sur le terrain, on la mesure généralement grâce à un clinomètre ou un hypsomètre (en faisant la différence entre la hauteur de l'arbre et la hauteur de la base de la couronne).

La hauteur de la base de la couronne est un paramètre particulièrement intéressant à obtenir à l'échelle de l'arbre individuel puisqu'elle est un indicateur de la croissance des arbres, de l'état de santé de la forêt et de la qualité du bois disponible. Elle peut également servir à déterminer si des opérations sylvicoles sont nécessaires et être utilisée pour prédire le comportement des feux. Enfin, elle peut-être utilisée comme paramètre dans des modèles de luminosité (Vauhkonen, 2010).

Puisque les impulsions laser ont une bonne capacité de pénétration de la canopée, les données provenant de capteurs lidar présentent un potentiel intéressant pour étudier la distribution verticale de la canopée et estimer la longueur de la couronne. Cependant, assez peu d'études

portant spécifiquement sur la mesure de la longueur de la couronne vivante avec des données issues de capteurs lidar à petite empreinte ont été publiées à ce jour.

Dans les lignes qui suivent, nous ferons la revue de différentes méthodes de mesure de la hauteur de la couronne vivante publiées dans la littérature scientifique. En premier lieu, nous présenterons des méthodes se basant sur des modèles statistiques construits avec des indicateurs dérivés de la distribution verticale des points lidar pour prédire la longueur de la couronne ainsi que d'autres paramètres pouvant décrire la structure verticale de la canopée (hauteur, densité apparente de la canopée, volume). En second lieu, nous nous intéresserons aux méthodes reposant sur l'examen de la distribution verticale des retours pour estimer la longueur de la couronne. En troisième lieu, les méthodes basées sur l'étude de la forme du nuage de points seront abordées.

Naesset et Økland (2002) ont utilisé des régressions linéaires avec transformation logarithmique pour prédire, entre autres, la hauteur moyenne de la couronne et le ratio de la couronne (« *relative crown length* ») pour des arbres individuels et pour des moyennes calculées sur des placettes d'échantillonnage. Les données lidar utilisées ne comportaient que deux retours (premiers retours et derniers retours). La hauteur des retours a été calculée comme la différence entre l'altitude d'un retour et l'altitude d'un modèle de terrain construit avec les retours classifiés sol. Les retours ayant une hauteur de moins de deux mètres ont été exclus afin d'éliminer les retours attribuables au sol, aux pierres, aux buissons ou autres objets bas n'appartenant pas à la canopée. Le couvert forestier des zones à l'étude était majoritairement composé de deux espèces de conifères soit l'épinette de Norvège et le pin sylvestre (*Picea abies*, *Pinus Sylvestris*).

Pour sélectionner leurs modèles, un ensemble de 14 variables dérivées des hauteurs des premiers retours et des derniers retours lidar a été créé. Parmi ces variables, on retrouve, pour chacun des deux groupes de retours, quatre percentiles (25, 50, 75 et 90), la hauteur maximale, la hauteur moyenne et le coefficient de variation de la hauteur. Ensuite, un modèle global a été construit avec toutes les variables. Enfin, ce modèle a été soumis à une analyse de régression par étapes (« *stepwise selection* ») pour déterminer quelles sont les variables qui devraient appartenir aux modèles finaux. Le modèle sélectionné pour prédire la hauteur

moyenne de la couronne utilisait comme variable les percentiles 25 des premiers retours et des derniers retours. Pour le ratio de la couronne, seul le coefficient de variation des premiers retours avait été retenu comme prédicteur. Puisque les auteurs ne disposaient pas de données indépendantes pour valider leurs résultats, ils ont eu recours à un processus de validation croisée (une observation est retirée du jeu de données, le modèle est ajusté aux données restantes et une hauteur est prédite pour l'observation retirée; cette opération est répétée pour tous les arbres). Les coefficients de détermination (R^2) obtenus avec ces modèles sont de 0.53 et 0.51 respectivement pour les arbres individuels. Les écarts types entre les valeurs prédites et observées sont de 2.19 m pour la hauteur moyenne de la couronne et de 10.48% pour le ratio. Pour les placettes d'échantillonnage, des résultats ont été publiés séparément pour deux zones d'étude. Dans le cas de la hauteur moyenne de la couronne, des R^2 de 0.71 et 0.61 et des écarts types de 1.24 et 1.52 ont été obtenus. Pour ce qui des ratios, les R^2 étaient de 0.6 et 0.47 et les écarts type de 6.32% et 7.11%

Une expérience similaire a été menée par Andersen, McGaughey et Reutebuch (2005) sur une forêt mixte avec un appareil lidar pouvant enregistrer des retours multiples. Cependant, les auteurs n'ont travaillé qu'à l'échelle de la placette d'échantillonnage. Ils ont utilisé une démarche s'apparentant fortement à celle présentée précédemment afin de construire leurs modèles prédictifs. En plus des variables utilisées par Naesset et Økland (2002), ils ont calculé la densité de premier retour se trouvant sous la surface de la canopée (en pourcentage). Seules les hauteurs des retours non classifiés sols ont été utilisées pour le calcul des variables. Le modèle retenu pour estimer la hauteur de la base de la canopée utilisait le coefficient de variation de la hauteur, trois percentiles de hauteur (25, 50 et 75) et la mesure de densité présentée plus haut. Le coefficient de détermination de leur modèle était de 0.77 avec un RMSD (« *root-mean-square-error* ») de 3.9 m Le $RMSE_{cv}$ (« *RMSE for cross validation* ») obtenu par validation croisée était de 4.1 m.

À la lumière des résultats publiés par ces auteurs, malgré l'importance des écarts types et RMSE reportées, il semble qu'une relation statistique puisse être établie entre les variables dérivées de la hauteur des retours lidars et la longueur de la couronne vivante. Cependant, certains doutes peuvent être exprimés quant à l'utilisation de telles méthodes pour la

prédiction de la longueur de la couronne. Si la méthode utilisée pour la sélection des variables (sélection séquentielle) est parfois justifiable dans un contexte d'exploration pour un phénomène inconnu, on formule à son endroit certaines critiques. En effet, selon cette méthode, la combinaison de variables retenue est celle qui produit le meilleur coefficient de détermination. Or, cette combinaison ne représente pas nécessairement le choix le plus logique de variables et rien ne nous garantit que ce choix serait le même si on étudiait le même phénomène avec un autre jeu de données (Malek *et al.* 2007). Il serait donc préférable de construire les modèles en sélectionnant les variables en se basant sur notre connaissance du phénomène.

Dans une étude consacrée à l'estimation de la biomasse et de la densité apparente de la canopée, Riaño et ses collaborateurs (2004) ont eux aussi utilisé des modèles statistiques pour prédire la longueur de la couronne vivante de pins sylvestres (*Pinus sylvestris*) (puisque cette variable est utilisée dans leurs équations de prédiction de biomasse et de densité). Les mesures terrains comprenaient la hauteur totale, le diamètre à hauteur de poitrine, la hauteur de la base de la couronne et la surface projetée au sol de la couronne, mesurée vers les quatre points cardinaux. Le capteur lidar utilisé pour cette recherche permettait l'enregistrement des premiers et derniers retours. La hauteur des points lidars a été calculée en soustrayant à l'altitude des retours l'altitude correspondante sur un modèle numérique de terrain.

Pour estimer la hauteur de la base de la couronne à l'échelle de la placette d'échantillonnage, les premiers et derniers retours ont été classifiés en deux catégories soit ceux appartenant à la canopée et les autres. Pour ce faire, différentes méthodes ont été testées par les auteurs soit, une limite fixe de trois mètres, une méthode de regroupement basée sur la minimisation de la distance euclidienne, un partitionnement par la méthode des K-centroïdes (« K-means clustering »), un algorithme de type espérance-maximisation (basé sur le maximum de vraisemblance) et une combinaison des deux dernières méthodes. Les meilleurs coefficients de corrélations entre les variables se rapportant à la hauteur base de la couronne (minimale et percentile 10) et les prédicteurs lidars choisis (hauteur minimale et le premier percentile des retours classifiés canopée) ont été obtenus avec les méthodes utilisant les K-centroïdes. À cette échelle, les estimateurs lidars performant assez mal en ce qui concerne l'estimation de la

hauteur minimale de la base de la couronne. Avec les prédictors lidar utilisés, soit la hauteur minimale et le percentile de retours classifiés canopée, des coefficients de corrélation (R) de 0.25 et 0.3 ont été rapportés par les auteurs. Le percentile 10 de la hauteur de la couronne peut quant à lui être prédit beaucoup plus précisément. En effet, les coefficients de corrélation (R) obtenus pour cette variable sont de 0.95 et de 0.97.

Une relation entre les prédictors lidar et les arbres individuels a pu être établie en segmentant les retours ayant été identifiés comme faisant partie de la canopée. Pour ce faire, une méthode de segmentation semblable à celle suggérée par Morsdorf (2003) a été utilisée et 183 arbres ont été isolés. Les positions des arbres mesurées sur le terrain ont servi de noyaux pour initier le partitionnement. Pour les deux prédictors lidar utilisés (hauteur minimum lidar et percentile des retours), les auteurs ont obtenu un R^2 de 0.65. Ces résultats nous permettent d'observer que les valeurs prédites avec le lidar sont corrélées avec les mesures effectuées sur le terrain. Cela dit, nous continuerons notre revue avec les méthodes reposant sur l'étude de la distribution verticale des retours pour établir la longueur de la couronne.

Dans une étude réalisée en Finlande, portant sur la reconstruction de la couronne de 50 arbres individuels, Pyysalo et Hyypä (2002) ont utilisé l'histogramme de fréquence de la hauteur des premiers retours lidar afin de mesurer la hauteur de la limite inférieure de la couronne. La densité de premiers retours des données utilisées pour leur expérience était d'environ 10 points/m². Les arbres de leur échantillon appartenaient à trois espèces, soit l'épinette de norvège (*Picea Abies*), le pin sylvestre (*Pinus Sylvestris*) et le bouleau (espèce non précisée par les auteurs).

Après une segmentation utilisant un algorithme « watershed », les points dont l'altitude était près du modèle de terrain ont été identifiés pour chaque segment et ont été exclus. Ensuite, des histogrammes de fréquence avec un intervalle de classe de 0.5 m ont été préparés. Pour chacun, la zone continue la plus étendue où aucune mesure n'avait été enregistrée (donc où la valeur de l'histogramme était de 0) a été recherchée. La valeur d'élévation du premier retour situé en haut de cette zone a été extraite et utilisée comme hauteur de la base de la couronne.

Dans leurs résultats, les auteurs rapportent un écart type de 4.0 m et un biais de -3.0 m entre les mesures terrain et les hauteurs obtenues avec leur méthode.

Afin de pouvoir extraire d'autres paramètres de la couronne dans le but de faire une classification par espèce, Holmgren et Persson (2004) ont calculé la hauteur de la base de la couronne de 135 arbres individuels (épinettes de Norvège et pin sylvestres) en utilisant une méthode inspirée de celle de Pyysalo et Hyypä (2002). Les données lidar utilisées comportaient deux retours par impulsion. La démarche suivie par les auteurs peut être résumée comme suit. D'abord, les nuages de points correspondant à chacun des arbres ont été divisés en tranches ayant une hauteur de 0.5 m. Pour chacun des arbres, le nombre total de retours non sol a été extrait. Les tranches contenant moins de 1% de ces retours se sont vu attribuer une valeur de 0 alors que les autres ont reçu la valeur 1. Afin de réduire l'influence des retours provenant de la végétation basse ou d'arbres voisins, un filtre médian à une dimension et avec une largeur de 9 a été utilisé sur le tableau (« *array* ») contenant les valeurs de hauteur. Finalement, la hauteur de la base de la couronne a été calculée comme la distance entre le sol et le plus bas retour lidar situé au-dessus de la plus haute tranche ayant reçu la valeur 0. Un coefficient de corrélation de Pearson (R) de 0.84, avec un RMSE de 2.82 m, a été obtenu entre les hauteurs de la base de la couronne mesurée sur le terrain et les hauteurs extraites des données lidar. En moyenne, la hauteur de la base de la couronne était surestimée de 0.75 m. Les auteurs constatent qu'en général, la mesure était davantage surestimée dans le cas des arbres ayant les couronnes les plus basses (Figure 3.1).

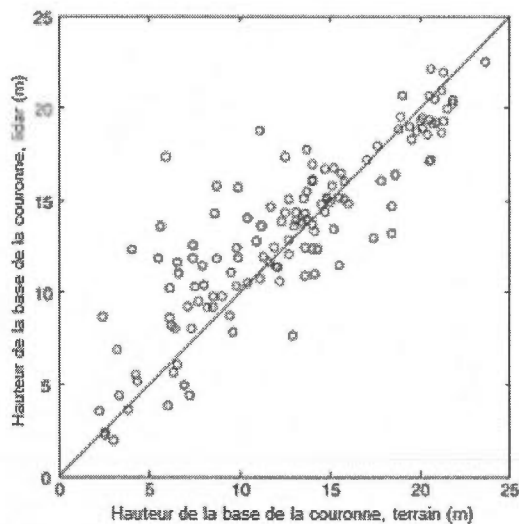


Figure 3.1 Relation entre mesures terrain et prédictions lidar.

Source: Traduit de Holmgren et Persson, 2004

Dans une publication portant sur la segmentation tridimensionnelle d'arbres, Reitberger et ses collaborateurs (2009) ont utilisé une autre variante des méthodes proposées par Pyysalo et Hyypä (2002), ainsi que par Holmgren et Persson (2004) pour obtenir une mesure de la hauteur de la base de la couronne afin de séparer des nuages de points correspondant à des arbres en différents groupes (points couronne et points tronc). L'étude a été menée sur une forêt mixte comportant plusieurs espèces (épinette de Norvège, hêtre rouge, sapin pectiné, érable sycomore, érable plane, tilleul (*Picea abies*, *Fagus sylvatica*, *Abies alba*, *Acer pseudoplatanus*, *Acer platanoides*, *Tilia europaea*)). Les retours lidar ont été extraits à partir de données à onde complète (full waveform).

En premier lieu, les points ayant une hauteur inférieure à un mètre ont été identifiés comme des retours au sol. Les points restants ($N_{s, tree}$) ont été divisés entre les deux autres groupes en obtenant la hauteur de la base de la couronne grâce à la démarche suivante. D'abord, ces points ont été divisés en « l » strates de 0.5 m (Figure 3.2, a) et le nombre de points par strates (n_i) à été extrait. Puis, un vecteur $N_p = \{n_i / N_{s, tree}\} (i = 1, \dots, l)$ a été créé et a été lissé avec un filtre gaussien à une dimension d'une largeur de 3 (3x1). Finalement, la base de la couronne a été établie comme la hauteur correspondant à 0.15% du nombre total de points

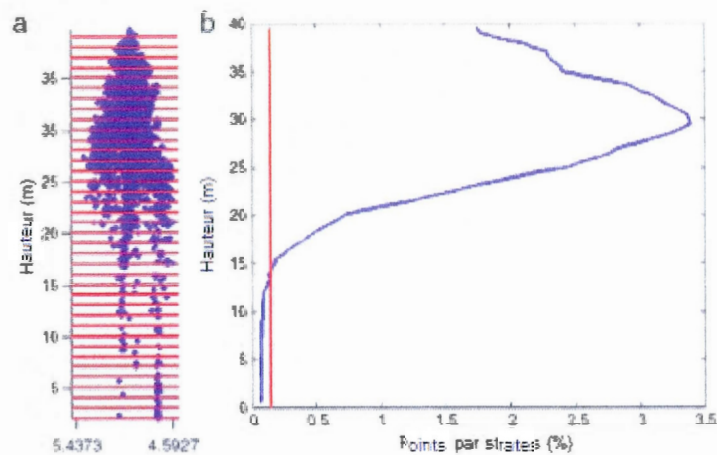


Figure 3.2a Division du nuage de point en strate.

Figure 3.2b Résultat du filtre sur le vecteur et hauteur estimée.

Source: Traduit de Reitberger *et al.*, 2009

classifiés arbres (Figure 3.2, b). Cependant, la précision de l'évaluation de la longueur de la couronne avec cette méthode n'a pas été quantifiée par les auteurs.

Dans un autre article consacré à la segmentation et à l'extraction de paramètres d'arbres individuels, Solberg et ses collaborateurs (2006) ont présenté une méthode d'estimation de la longueur de la couronne basée sur l'étude des percentiles. La recherche présentée a été menée sur une forêt avec une structure d'âge complexe dominée par l'épinette de Norvège (*Picea abies*). Les arbres situés dans les placettes d'échantillonnages ont été classifiés en 5 catégories en fonction de leur statut dans la canopée soit dominant, co-dominant, sous-dominant, opprimé ou mort. Seuls les arbres des trois premières catégories ont été utilisés pour l'étude de la longueur de la couronne. Le capteur lidar employé pour acquérir les données permettait l'enregistrement de deux retours par impulsion (premier et dernier retour). Comme pour les études précédentes, la hauteur des premiers et derniers retours lidar a été calculée en faisant la différence entre l'altitude des points et l'altitude d'un modèle numérique de terrain généré avec les points classifiés sol.

Après le processus de segmentation, les premiers retours ont été utilisés pour créer un nuage de points pour chacun des arbres. Pour chaque nuage, les déciles (10, 20, 30, etc.) de la distribution de hauteur ont été calculés. Ensuite, la hauteur de la base de la couronne a été fixée comme égale au décile ayant la plus grande distance avec son décile inférieur. Afin de s'assurer que les couronnes soient toujours bien séparées du sol, une hauteur minimale pour la base de la couronne a été définie arbitrairement. Cette hauteur minimale a été calculée en additionnant 0.25 m au résidu d'ajustement (ce résidu est calculé en cherchant la médiane de la différence entre le modèle numérique de surface et les hauteurs terrain associées aux cimes des arbres). Dans le cas de cette recherche, cette hauteur minimale était de 0.85 m.

Solberg et ses collaborateurs (2006) ont appliqué cette méthode à 58 arbres répartis en 8 placettes d'échantillonnage. En moyenne, la hauteur de la base des couronnes était surestimée par environ trois mètres et elle correspondait au percentile 20. Les auteurs constatent que la surestimation de hauteur était plus prononcée pour les arbres les plus grands. Pour les arbres individuels, la relation entre les mesures terrains et lidar varie de modérée à faible. Le coefficient de corrélation (R) entre les mesures terrain et lidar était de 0.45 avec un RMSE de 3.5 m. Pour une de leur placette, où tous les arbres ont été mesurés ($n = 38$), un coefficient de corrélation de -0.11 a été obtenu. Une forte corrélation a été établie entre les moyennes des placettes et les moyennes des hauteurs mesurées sur le terrain ($R=0.91$).

Popescu et Zhao (2008) ont publié un article consacré à l'estimation de la hauteur de la base de la couronne d'arbre individuel en se basant sur des profils de hauteurs et d'intensité. Aux fins de leurs recherches, plusieurs arbres ont été mesurés sur le terrain dans des placettes d'échantillonnages situées dans des plantations de pins sylvestres, des pinèdes à l'état naturel et des forêts composées d'arbres décidus (espèces non précisées par les auteurs). Seuls les arbres appartenant aux strates supérieures de la canopée ont été utilisés pour l'étude. Les données lidar comportaient deux retours par impulsion (premier et dernier) ainsi que les valeurs d'intensité. La hauteur des points lidar a été calculée en faisant la différence entre l'altitude des retours et l'altitude d'un modèle de terrain interpolé avec les retours classifiés sol. Après identification des cimes grâce à un algorithme recherchant les maximums locaux,

117 des 1004 arbres mesurés sur le terrain, dont 94 pins et 23 arbres décidus, ont pu être localisés et appariés avec certitude avec le maximum local leur correspondant.

Dans le cadre de cette étude, les auteurs ont travaillé les données lidar sous forme de voxels. Deux jeux, un pour les fréquences et un pour l'intensité, composés de strates de données lidar (« *height bins* ») ont été générés sous forme d'images multibandes avec un intervalle de hauteur de 1 m et des pixels d'une dimension de 0.5 m (donc des voxels de 0.5x0.5x1 m.). Les images comportaient chacune 31 bandes. Les 30 premières correspondant aux strates de 0 à 30 m et la dernière comportant tous les retours au-dessus de 30 m. Pour la première image (fréquences), chaque bande correspond à une strate de hauteur et la valeur d'un pixel représente le nombre de retours exprimé en pourcentage par rapport au nombre total de points cumulés pour tous les pixels de la colonne à cette position (Figure 3.3). Quant à la seconde image (intensité) elle est générée en faisant la somme des valeurs d'intensité de tous les retours de chaque voxels.

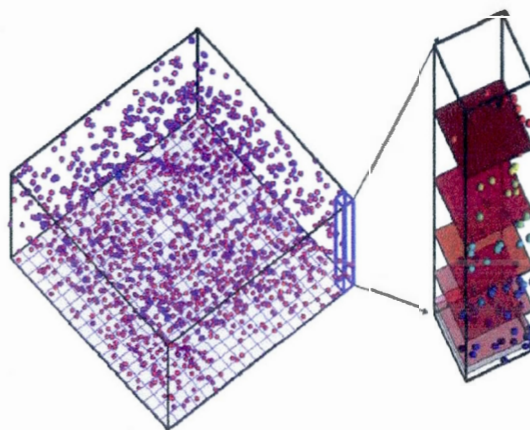


Figure 3.3 Illustration des concepts de strates de hauteur et de voxels.

Source: Popescu et Zhao, 2008

Pour extraire l'information correspondant aux arbres individuels, des polygones circulaires avec un rayon égal au diamètre des couronnes des arbres à analyser (les auteurs présentent également une méthode permettant de mesurer le diamètre automatiquement) sont créés et utilisés pour découper les images multibandes. Ainsi, en faisant la somme des « voxels » de chacune des bandes, des profils verticaux de fréquence et d'intensité peuvent être produits pour chaque arbre (Figure 3.4).

Tel que démontré par Lefsky et ses collaborateurs (1999) dans une étude sur l'estimation de la biomasse avec des données lidar à onde complète et à large empreinte, la majorité de l'énergie émise par le lidar (environ 65%) est réfléchiée par la strate supérieure de la canopée. Puisque cette zone intercepte la plus grande partie de la lumière (et donc, théoriquement, des retours dans le cas du lidar à petite empreinte), Popescu et Zhao (2008) concluent qu'elle devrait donc correspondre au maximum en terme de fréquence et d'intensité sur les profils verticaux. Ainsi, la chute de fréquences ou d'intensités suivant ce maximum devrait indiquer la base de la couronne.

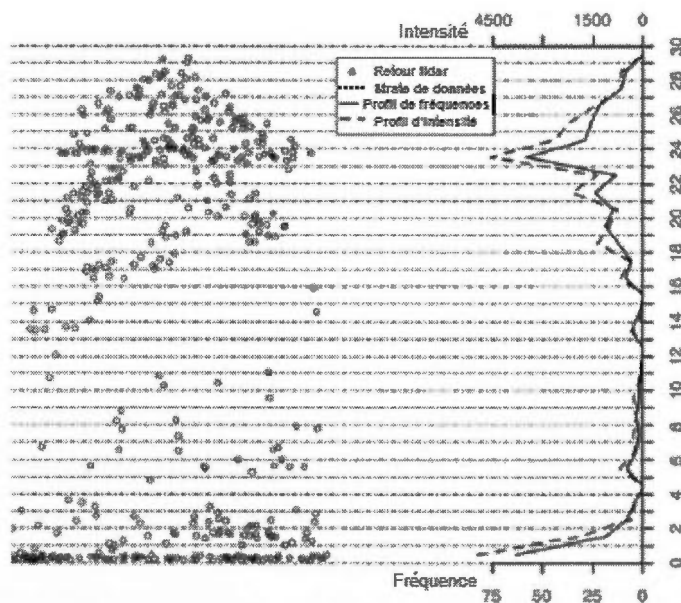


Figure 3.4 Exemple d'un profil vertical de hauteur et d'intensité.

Source: Traduit de Popescu et Zhao, 2008

Pour extraire automatiquement la hauteur de la base des couronnes, les auteurs ont choisi d'analyser la forme de polynomiales de degré 4 ajustées aux profils de fréquence et d'intensité. Théoriquement, la chute de fréquence ou d'intensité, donc la base de la couronne, correspond à la première inflexion de la courbe suivant son maximum. L'emplacement de cette inflexion peut être déterminé à partir de la polynomiale en la dérivant. La dérivée première de la polynomiale est égale à 0 aux valeurs extrêmes et le signe de la dérivée seconde permet de déterminer si le graphique de la fonction est concave ou convexe donc, si un point critique est un maximum ou un minimum. Un point d'inflexion est présent quand la dérivée première est une valeur extrême alors que la dérivée seconde est de 0.

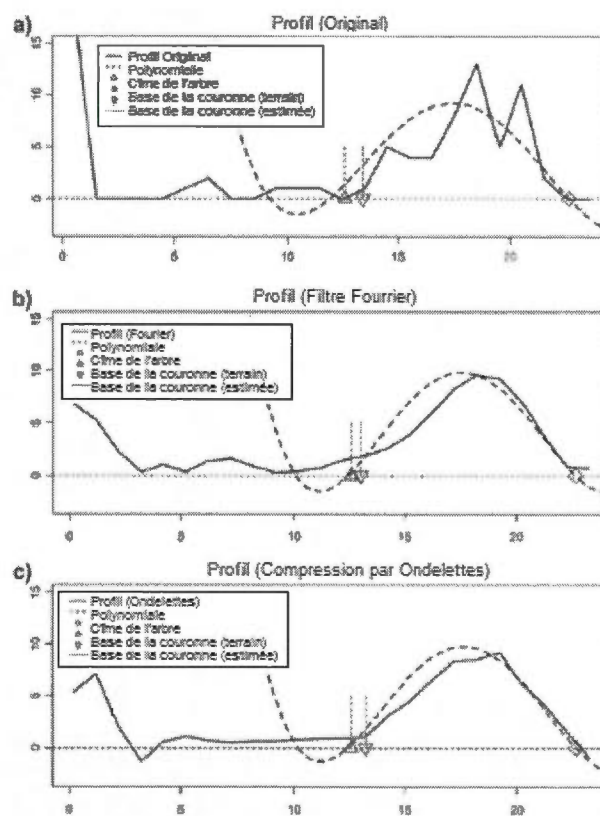


Figure 3.5 Exemple d'ajustement d'une polynomiale à un profil vertical.

Source: Traduit de Popescu et Zhao, 2008

Puisque les profils d'intensité obtenus avec leur méthode présentaient souvent des changements abrupts de valeur pouvant nuire à l'ajustement de la polynomiale, Popescu et Zhao (2008) ont également testé deux méthodes de lissage (ou plus exactement de réduction du bruit), soit une transformée de Fourier (filtre de Fourier) et une compression par ondelettes. Ces « filtres » ont été appliqués aux profils avant l'ajustement de la polynomiale (Figure 3.5). Pour certains arbres, les auteurs n'ont pas pu détecter une chute dans les profils avec la méthode proposée. Dans ces cas, la hauteur de la base de la couronne a été estimée au percentile 25 de la distribution verticale des hauteurs lidar à l'intérieur de la couronne. Les coefficients de détermination (R^2) obtenus par les auteurs grâce à une régression entre les valeurs prédites avec leurs analyse des profils de fréquences sont de 0.79 pour la transformée de fourrier, 0.78 pour la compression par ondelettes, 0.76 pour le profil non filtré et 0.11 lorsque la hauteur de la base de la couronne à été prédite avec le percentile 25.

Afin de tester trois hypothèses soit que, 1) la méthode de traitement influence la hauteur de la base de la couronne mesurée, 2) l'espèce (pin ou décidu) de l'arbre influence la hauteur de la base de la couronne mesurée et 3) l'influence de l'espèce sur la hauteur mesurée dépend de la méthode de traitement, Popescu et Zhao (2008) ont procédé à une analyse de la variance (ANOVA) avec mesures répétées. Pour la première hypothèse, la valeur p (test de Wilke) était de 0.0507, ce qui signifie que, a un niveau de signifiante de 5%, l'hypothèse est marginalement rejetée donc la méthode de traitement n'aurait pas un effet significatif la précision de la mesure obtenue. En ce qui concerne la seconde hypothèse, la valeur du p était basse (0.0003) ce qui nous indique que l'espèce de l'arbre mesuré a une influence significative sur la précision de la mesure obtenue. Il n'a pas été possible de conclure que l'interaction entre l'espèce et la méthode de traitement avait une influence la qualité de la mesure (l'hypothèse est rejetée marginalement avec un p de 0.0694).

Différents modèles ont également été testés par ces mêmes auteurs afin de prédire plus précisément la hauteur de la base de la couronne. Les meilleures prédictions ont été obtenues avec un modèle utilisant pour variable la hauteur de l'arbre mesuré par lidar et la hauteur de la base de la couronne dérivée du profil de fréquence (R^2 de 0.80 et RMSE de 2.03 m).

Théoriquement, la distribution spatiale des valeurs « z » est un index de la probabilité de rencontrer un espace vide dans la canopée. Coops et ses collaborateurs (2007) se sont basés sur ce raisonnement pour décrire le profil vertical de sapins de douglas et de pruche de l'ouest (*Pseudotsuga menziesii* spp., *Tsuga heterophylla*) à l'aide de données lidar multiretour à faible densité (environ 0.7 retours/m²).

Pour ce faire, les données lidar ont d'abord été utilisées pour créer des profils de la densité apparente du feuillage projetée (en se basant sur une méthode proposée par Lovell *et al.* 2003). Ces profils ont ensuite été ajustés aux données terrain en utilisant des distributions de Weibull à deux paramètres (fonction de densité de probabilité). Cette méthode a permis aux auteurs de constater que la longueur moyenne des couronnes pouvait être prédite en se basant sur l'un des paramètres de la fonction de Weibull (paramètre β). En effet, la méthode proposée permet de prédire correctement le volume occupé par la couronne. Ce volume peut-être considéré comme une expression de la profondeur de la couronne par unité de surface. Donc, puisqu'il existe forte relation entre le paramètre β et la profondeur de la couronne, il est raisonnable d'émettre l'hypothèse que la hauteur de la base de la couronne pourrait être estimée avec une méthode semblable.

Inspirés par ces constats, Dean et ses collaborateurs (2009) ont donc élaboré une méthode permettant de prédire la hauteur moyenne de la base et la hauteur médiane de la couronne de pins taeda (*Pinus taeda*) pour des peuplements homogènes. Leur méthode se base sur l'ajustement d'une fonction de Weibull tronquée à des profils dérivés de la distribution verticale des hauteurs lidar. Les données lidar utilisées pour l'étude comportaient deux retours par impulsions.

Pour créer les profils de hauteur, les données lidar ont été transformées en un espace voxel avec une résolution verticale de 0.7 m et une étendue horizontale égale à la taille du peuplement en utilisant une méthode similaire à celle utilisée par Solberg et son équipe (2006). Pour chacun des voxels, la hauteur relative à partir du sommet de la canopée et la fréquence relative de retours a été calculée. La fonction de Weibull tronquée a été ajustée aux profils de hauteurs créés avec ces deux attributs (Figure 3.6). Afin de déterminer

l'emplacement de la troncature, correspondant théoriquement au plus bas retour pouvant être attribué avec certitude à la canopée, une série de droite de régression a été calculée en utilisant à chaque fois 4 points de données consécutifs (en commençant par les points égaux au mode de la distance relative au sommet). La troncature a été appliquée au milieu des deux derniers points du premier groupe où la pente de la régression était inférieure à 0.1. Cela dit, la profondeur relative de la canopée peut ensuite être estimée avec la distribution de Weibull tronquée et la hauteur de la base de la couronne peut être calculée comme le produit entre (1 - profondeur estimée) et le sommet de la canopée.

En comparant leur estimation lidar et leur mesure terrain, Dean et ses collaborateurs (2009) ont obtenu un écart moyen de 0.6 m et le résultat d'un test de Student (t) indique que la moyenne des estimations lidar est significativement différente de la moyenne des mesures terrain ($p=0.03$). En observant le graphique des différences entre les hauteurs de la base de la couronne prédite et les mesures terrain (Figure 3.7) on remarque que plus la hauteur de la base de la couronne est basse, plus la méthode proposée la surestime. Bien qu'il semble que la hauteur de la base de la couronne ne puisse être évaluée directement avec cette méthode, l'erreur entre les résultats lidar et les mesures terrain pourrait aisément être corrigée en utilisant un modèle linéaire.

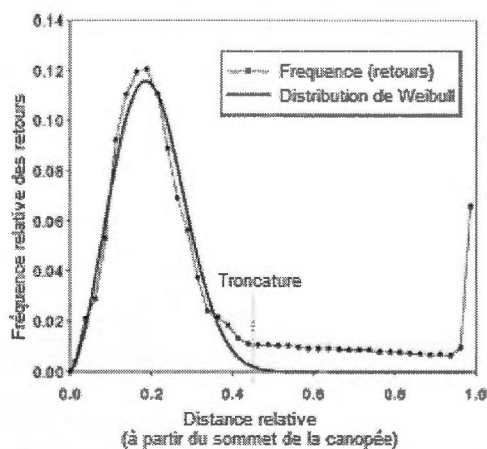


Figure 3.6 Distribution des fréquences relative et distribution de Weibull.

Source: Traduit de Dean *et al.* 2009

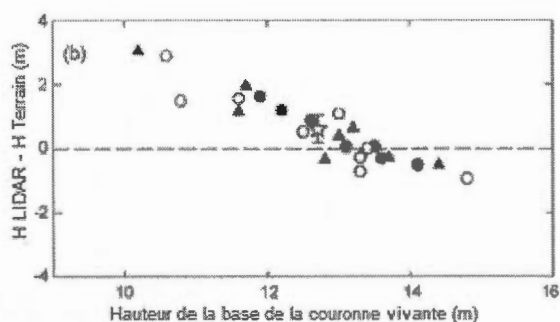


Figure 3.7 Différence entre hauteurs de base de la couronne prédites et mesures terrain.
Source: Traduit de Dean *et al.*, 2009

La revue des méthodes basées sur l'étude de la distribution verticale des retours étant terminée, nous exposerons maintenant les méthodes basées sur l'étude de la forme du nuage de points. Récemment, des approches permettant de modéliser la forme d'arbres segmentés en délimitant le nuage de points lidar circonscrit par le segment dans une enveloppe tridimensionnelle ont été développées et leur potentiel pour évaluer la hauteur de la base de la couronne a été évalué par quelques auteurs.

Kato ses collaborateurs. (2009) ont proposé une méthode utilisant une fonction RBF (Radial Basis Function) et des isosurfaces. Leur zone d'étude consistait en un arboretum. Ainsi, il y avait une grande variété d'espèces (conifères et feuillus), mais un faible nombre d'individus pour chacune d'entre elles. De plus, les arbres ayant servi à l'étude semblent relativement éloignés les uns des autres (en comparaison avec un milieu naturel) ce qui a dû faciliter les tâches de segmentation et d'appariement. Seuls les premiers retours lidar ont été utilisés aux fins de cette recherche. La densité de points (10-20/m² pour les arbres segmentés) était relativement élevée.

Suivant la préparation du modèle de hauteur de la canopée et la segmentation, les auteurs ont sélectionné des arbres isolés n'ayant pas de végétation en sous-couche. Les nuages de points correspondant à ces arbres ont été extraits. Pour pouvoir construire une enveloppe avec la méthode proposée par les auteurs, seuls les retours provoqués par la surface de la couronne doivent être conservés. Afin d'éliminer les retours provenant de l'intérieur de la couronne, la

méthode suivante a été utilisée. Le nuage de points a été séparé en strates selon les déciles (du maximum de hauteur vers le bas). Pour chacune des strates, une enveloppe convexe en deux dimensions a été produite et seuls les points situés sur celle-ci ont été conservés. Les points sélectionnés avec cette méthode ont été soumis à la fonction RBF et à l'algorithme d'isosurface pour la visualisation. Les mesures de la base de la couronne et de la plus basse branche ont été obtenues en extrayant les hauteurs à partir des enveloppes. Les résultats présentés par les auteurs montrent une forte corrélation entre les mesures terrains et lidar pour les conifères ($R^2 = 0.92$, RMSE = 1.62 m pour la base de la couronne, $R^2 = 0.72$, RMSE = 1.54 m pour la plus basse branche) alors que pour les feuillus, la corrélation est plutôt faible ($R^2 = 0.53$, RMSE = 2.23 m pour la base de la couronne, $R^2 = 0.51$, RMSE = 1.73 m pour la plus basse branche).

Holmgren et ses collaborateurs (2008) et Vauhkonen (2010) ont proposé et évalué la performance d'autres méthodes basées sur la reconstruction de la forme pour mesurer la hauteur de la base de la couronne. Les méthodes qu'ils ont utilisées sont basées sur la triangulation de Delaunay et sur l'utilisation des formes alpha (alpha shape).

Une forme alpha est une triangulation de Delaunay pour laquelle chacun des triangles ou tétraèdres (« simplex ») est comparé à la valeur d'un paramètre alpha (« α »). Pour la conceptualiser, on peut s'imaginer une sphère avec un certain rayon (« α ») qui exclue, ou découpe, tous les espaces où cette sphère ne contient aucun point. La taille du rayon de la sphère détermine le niveau de détail de la forme alpha (Figure 3.8). Théoriquement, si le rayon est égal à l'infini, le résultat est l'enveloppe convexe du nuage. Plus le rayon est court, plus le niveau de détail est élevé. Un rayon d'une longueur près de 0 sera égal au nuage de points.

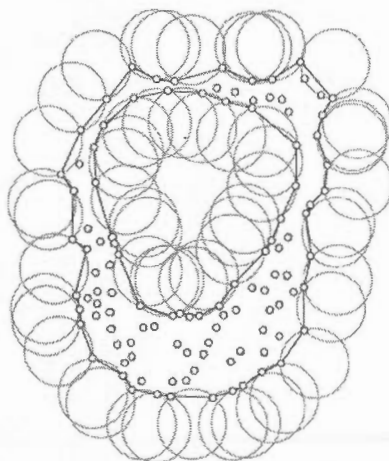


Figure 3.8 Illustration du concept de forme alpha en deux dimensions.

Source: Introduction to Alpha Shapes, Fisher, 2000

Holmgren et ses collaborateurs (2008) ont réalisé une étude sur des données provenant d'une forêt composée principalement d'épinettes de Norvège (espèce prédominante), de pins sylvestres et de bouleaux (*Picea abies*, *Pinus sylvestris*, *Betula spp.*). Leurs données lidar comportaient seulement les premiers et derniers retours et avaient une très haute densité (environ 50 retours/m²). Leur recherche a été menée sur les nuages de points segmentés (nous ne présentons pas les détails de la méthode de segmentation utilisée).

Dans leur étude, ils proposent de transformer les tétraèdres produits par la forme alpha en un espace voxel (0.15*0.15*0.15 m.). Ensuite, pour chacune des tranches de voxels, une superficie est calculée et normalisée par l'aire maximale de toutes les tranches de voxels et les valeurs normalisées inférieures à 0.1 sont considérées comme 0. La hauteur de la base de la couronne correspond alors à la plus petite superficie sous la superficie maximale de la moitié supérieure du nuage de points. Une hauteur minimale a été fixée à 12% de la hauteur maximale du nuage comme hauteur de la base de la couronne minimale.

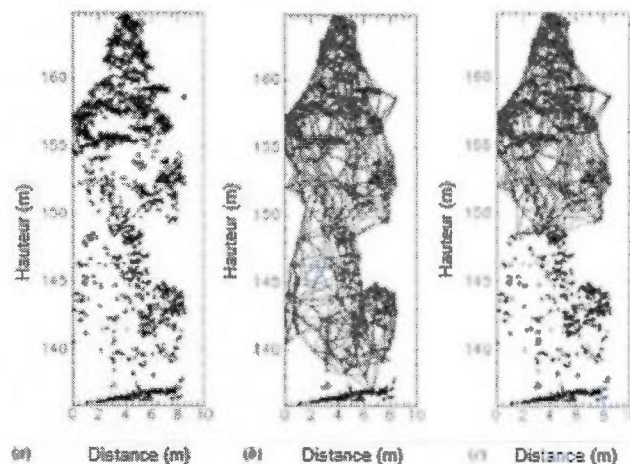


Figure 3.9 Exemple de forme alpha.

- a) nuage de point
- b) forme alpha ($\alpha = 1.5$)
- c) forme alpha n'utilisant que les points supérieurs à la base de la couronne

Source: Traduit de Holmgren *et al.*, 2008

La hauteur de la base de la couronne obtenue par cette méthode est ensuite utilisée par les auteurs pour subdiviser le nuage de points. Les points ayant une hauteur supérieure sont resomés à un algorithme de forme alpha et l'enveloppe de la couronne est produite (Figure 3.9). Cette dernière est utilisée subséquemment pour estimer le diamètre et le volume de la couronne. Les estimations de la hauteur de la base de la couronne obtenues avec leur méthode sont fortement corrélés avec les mesures terrain ($R = 0.91$) et la différence moyenne entre les deux mesures est de 0.61 m avec un écart type de 2.12 m.

Quant à Vauhkonen (2010), sa recherche visait spécifiquement à mesurer la hauteur de la base de la couronne d'arbre individuel et elle a été réalisée sur des pins sylvestres (*Pinus sylvestris*) avec des données lidar composées des premiers et derniers retours à une densité d'environ 4 points/m² (nous ne présentons pas les détails de la méthode de segmentation utilisée). Les méthodes basées sur les formes alpha présentées y sont comparées avec d'autres méthodes appliquées sur les mêmes données. Ces méthodes ont été exposées précédemment soit celles de Holmgren et Persson (2004), Solberg *et al.* (2006), Popescu et Zhao (2008) et

celle de Holmgren et *al.* (2008). Les méthodes proposées par l'auteur consistent en deux triangulations de Delaunay (TIN). L'une réalisée avec une contrainte basée sur le volume moyen des tétraèdres seulement et l'autre avec une contrainte supplémentaire basée sur le paramètre alpha.

À la lumière des résultats obtenus, l'auteur en arrive à la conclusion que pour l'estimation de la hauteur de la base de la couronne vivante, bien que les méthodes basées sur l'étude de la géométrie en 3D produisent des résultats acceptables, elles sont généralement moins performantes que les méthodes plus simples exploitant l'analyse du profil vertical des points. Dans une étude similaire, comparant différentes méthodes de mesure de la hauteur de la base de la couronne réalisée sur des moyennes calculées à l'échelle de placette d'échantillonnage et de peuplements composés principalement d'épinette de Norvège (*Picea abies*), Maltamo et ses collaborateurs (2010) sont arrivés à ce même constat.

Enfin, nous remarquons que pour toutes les méthodes, les résultats présentés démontrent que le lidar a tendance à surestimer la hauteur de la base de la couronne, que ce soit pour les arbres individuels ou pour des moyennes mesurées à partir de placette d'échantillonnage. Ceci pourrait indiquer que les branches les plus basses sont généralement mal représentées par les données lidar. L'importance rapportée par les auteurs pour cette surestimation de la hauteur varie de 0.6 à 4 m, environ, selon les méthodes. Les explications suivantes ont été proposées pour interpréter ce phénomène.

D'abord, puisque les données lidar sont acquises du haut des airs, il est raisonnable de croire que les strates supérieures de la canopée provoquent la majorité des retours. Ainsi, théoriquement, plus la localisation d'une branche est basse, plus ses chances d'être atteinte par un retour diminuent. Cette supposition est corroborée par des résultats publiés par Chasmer et ses collaborateurs (2004) où, en comparant des données lidar acquises depuis le sol à des données acquises depuis une plate-forme aéroportée, ils ont démontré que les tirs effectués depuis les airs atteignaient rarement la base de la canopée.

La plupart méthodes reposant sur l'examen de la distribution verticale des retours lidar que nous avons revues ont été testées avec des jeux de données ne comportant que 2 retours par impulsions. Possiblement, en utilisant des données lidar avec une plus grande densité et/ou permettant l'extraction d'un plus grand nombre de retours par impulsion (multi-retours ou onde complète), l'occurrence des retours sur les branches les plus basses pourrait être augmentée. Les très bons résultats obtenus par Holmgren et al. (2008) avec des données à très haute densité semblent confirmer cette hypothèse. Cependant, dans cette étude, il n'est pas possible de déterminer quelle part de l'amélioration est imputable à l'augmentation de la densité des retours. L'efficacité de la méthode utilisée ou même l'espèce des arbres analysés pourrait également avoir contribué à la précision de leurs résultats. L'importance de l'espèce sur la précision des estimations de longueur de la couronne lidar a été démontrée par Popescu et Zhao (2008).

Plusieurs des méthodes ont pour prémisse qu'il existe un espace entre la base de la canopée et le sol et que cet espace peut-être détecté grâce au profil vertical dérivé des données lidar. Ainsi, il est probable que la présence de végétation suffisamment haute dans les strates inférieure affecte les prédictions en leur ajoutant un biais (Maltamo *et al.* 2010).

Aussi, il est important de mentionner que la précision de la mesure dépend fortement de la qualité de la segmentation. Si le segment contenant la couronne est trop petit, des données concernant la distribution des points sont perdues. S'il est trop grand, des données provenant des arbres voisins risquent d'être incluses et de nuire à la précision de la mesure.

Finalement, la précision des données terrain et leur mise en relation avec les données de télédétection peut aussi causer un biais. D'abord, les appareils utilisés pour mesurer la hauteur sur le terrain peuvent être une source d'erreur et, selon la perception de l'individu faisant la mesure et de sa compréhension de la définition choisie, la plus basse branche appartenant à la canopée peut être mesurée à des endroits différents. Ensuite, il est possible que certains arbres soient mal appariés (qu'un arbre mesuré sur le terrain soit associé au mauvais nuage de points ou à un nuage mal segmenté).

CHAPITRE IV

MÉTHODOLOGIE

4.1 Introduction

Dans le cadre de cette étude, nous nous concentrons sur l'estimation de la hauteur de la base de la couronne à partir de données lidar multiretour. Pour ce faire, nous avons développé une méthode qui sera présentée dans ce chapitre. Elle se base sur l'analyse de la densité verticale des retours lidar des nuages de points d'arbres individuels de différentes espèces. D'abord, nous présentons la zone d'étude et nous décrivons les données utilisées. Ensuite, nous énonçons les choix méthodologiques et expliquons l'algorithme d'estimation de la hauteur de la base de la couronne. Enfin nous présentons les méthodes servant à évaluer l'efficacité de la méthode proposée.

4.2 Zone d'étude

La zone d'étude se trouve dans la Forêt d'Enseignement et de Recherche du lac Duparquet (FERLD), située à environ 35 km au nord-ouest de Rouyn-Noranda (Québec) ($\sim 48^{\circ}30'N$, $79^{\circ}22'W$) dans le domaine écologique de la sapinière à bouleau blanc (Figure 4.1). La topographie y est caractérisée par de basses collines avec des altitudes allant de 225 à 350 mètres environ. On y retrouve divers types de peuplements matures où la hauteur du couvert se situe généralement entre 25 et 30 mètres. Les espèces dominantes sont le pin gris (*Pinus banksiana*), l'épinette blanche (*Picea glauca*), le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides*), le bouleau blanc (*Betula papyrifera*), le sapin baumier (*Abies balsamea*) et l'épinette noire (*Picea mariana*). Le territoire de la FERLD comporte deux parties distinctes :

une zone dite de conservation (environ 25 % du territoire), ayant subi peu de perturbations humaines récentes, ainsi qu'une zone dite d'aménagement, consacrée à la recherche sur la gestion écosystémique des ressources forestières. L'historique des perturbations et l'âge des peuplements sont très bien documentés pour l'ensemble du territoire.

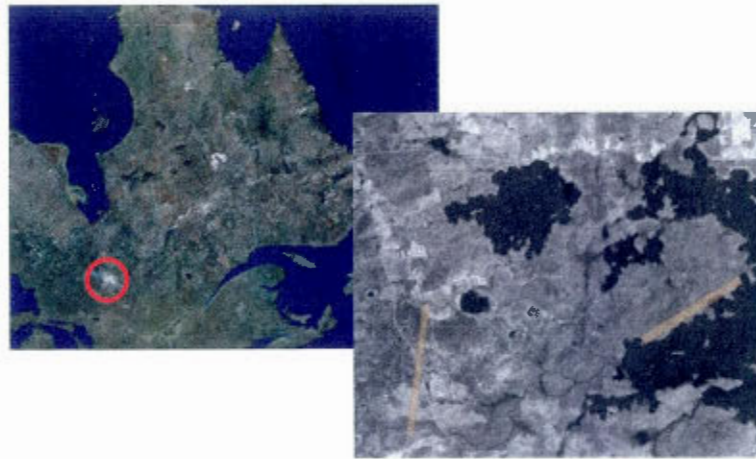


Figure 4.1 Emplacement de la zone d'étude au Québec et des données lidar acquises en 2007, Forêt d'enseignement et de recherche du Lac Duparquet.

4.3 Données de télédétection

Les données de télédétection (survol lidar) ont été acquises le 12 juillet 2007 avec un capteur ALTM3100 de Optech. Cet appareil permet l'enregistrement des premiers et derniers retours, ainsi que jusqu'à deux retours intermédiaires. L'altitude du survol était d'environ 600 mètres avec recouvrement entre les lignes de vol variant de 50% à 75%. Onze lignes de vol ont été effectuées dans la zone de conservation et douze dans la zone d'aménagement (Figure 4.1). La position de référence pour l'antenne GPS au sol a été obtenue à partir d'un point géodésique (les mesures prises avec l'antenne GPS au sol permettent de corriger en temps réel la position GPS mesurée par l'avion lors du survol). Les données (fichier de format LAS contenant la position des retours discrets calculés par le fournisseur) ont été livrées au cours de l'hiver 2008. La densité des premiers retours est d'environ 3.2 points par m² (pour une

ligne individuelle). Pour nos placettes d'échantillonnage, elle est de 7.4 points par m² (puisque'il y a un chevauchement entre les lignes de vol). Pour tous les retours, la densité est d'environ 13.4 points par m² (voir le tableau 4.1 pour un résumé des spécifications du survol).

Tableau 4.1 Spécifications pour l'acquisition des données lidar

Année d'acquisition	2007
Appareil lidar	ALTM3100
Puissance (μ J)	110
Altitude du survol (m, au-dessus du sol)	600
Divergence (mrad)	0.3
Empreinte au nadir (cm)	18
Fréquence des impulsions (Hz)	50 000
Angle maximal du scan (degrés)	10
Densité des premiers retours (retours/ m ²)	7.4

Le modèle de terrain utilisé pour l'étude a été produit avec des données issues d'un autre survol réalisé en juillet 2003 avec un capteur Optech ALTM2050, car ces données étaient accessibles et avaient été validées. Pour ce survol, les premiers et derniers retours ont été classifiés en tant que sol ou sursol avec le logiciel Terrascan de Terrasolid. La densité des points de premier retour était de 3 points/m², celle des derniers retours classifiés sol était de 0,19 points/m². La méthode d'interpolation utilisée pour produire le modèle de terrain est de type « point à matrice ». Cette méthode consiste à assigner aux pixels d'une matrice régulière, la valeur Z du point d'altimétrie laser de coordonnées X et Y correspondantes. Lorsque plusieurs points tombent dans une même cellule, la valeur minimale est conservée. Une interpolation de type distance inverse pondérée est ensuite utilisée afin d'estimer les valeurs des cellules dépourvues de données (Véga, 2006).

Afin de déterminer si un ajustement entre les données des survols de 2003 et 2007 était nécessaire, des points de contrôle situés sur des affleurements rocheux ont été identifiés. Pour ces points, les altitudes des retours lidar acquis en 2007 ont été comparées aux altitudes du modèle de terrain créé avec les données de 2003. Un écart moyen de 0.2 m a été calculé entre les deux jeux de données. Les données acquises 2003 ont été choisies comme référence.

Par conséquent, 0.2 m a été ajouté à l'altitude des retours de 2007. La distance entre chacun des retours lidars et le sol (hauteur) a été déterminée en faisant la différence entre l'altitude ajustée du retour (2007) et l'altitude du pixel correspondant à sa position (X,Y) sur le modèle numérique de terrain (2003).

4.4 Données terrain

Au cours de l'été 2007, six placettes d'échantillonnage carrées de 576 m² (24m x 24m) ont été mesurées. Une placette d'échantillonnage et des mesures GPS supplémentaires ont été acquises au cours de l'été 2008. Le type d'échantillonnage utilisé pour définir la position des placettes est non probabiliste. Leurs emplacements respectifs ont été choisis de façon à représenter la diversité des peuplements présents dans la zone d'étude.

Pour chacune des placettes, l'espèce, la hauteur totale et la hauteur de la plus basses branches vivantes (excluant les bourgeons épicorniques) ont été inventoriés pour les arbres ayant un diamètre à hauteur de poitrine supérieur à quatre centimètres. La hauteur totale des arbres et la hauteur de la plus basse branche vivante ont été mesurées avec, soit un hypsomètre (Vertex), soit une perche graduée (hauteurs inférieures à neuf mètres). La hauteur de la plus basse branche vivante a été mesurée à la base de la branche, là où elle s'attache au fût de l'arbre. Chacun de ces arbres a été positionné très précisément, dans un système de coordonnées relatif (X,Y,Z), avec un théodolite. Enfin, pour établir la position absolue des placettes, des mesures GPS (utilisant la phase du signal) et GPS-GLONASS ont été prises à découvert, en intégrant des relevés de position acquis sur de longues périodes de temps (une heure) sous des configurations satellites optimales. Un cheminement entre les points GPS et les points de référence des placettes a ensuite été effectué avec un théodolite afin d'établir leur position absolue.

Les jeux de données terrain ont été comparés aux données lidar et à des photos aériennes numériques à haute résolution afin de vérifier l'exactitude de leur positionnement. Pour ce faire, différentes stratégies de visualisation ont été utilisées dans *ArcMap* et *ArcScene*. La

position des trouées, des arbres isolés, dominants ou sous couverts, la topographie (à l'échelle de la placette) et la photo-interprétation (espèce) ont été utilisées afin de s'assurer que les données terrain et de télédétection étaient intégrées le plus précisément possible.

4.5 Extraction des nuages de points

Dans le cadre de cette étude, nous avons fait le choix de travailler avec les trois espèces les plus abondantes parmi les arbres matures retrouvés sur nos placettes d'échantillonnage soit le pin gris (*Pinus Banksiana*), l'épinette blanche (*Picea Glauca*) et le peuplier faux-tremble (*Populus Tremuloïdes*). Pour chacune de ces espèces, nous avons identifié 15 individus visibles du haut des airs (la taille totale de l'échantillon (n) est donc de 45). Les nuages de points lidar correspondant à des arbres individuels ont été extraits manuellement avec la méthode suivante. D'abord, des polygones circonscrivant la couronne de chacun des individus ont été tracés en visualisant les données dans les logiciels *Arcmap* et *Arcscene*. Ensuite, tous les retours lidar dont la position (X,Y) se trouvait à l'intérieur d'un polygone ont été extraits et associés à l'individu correspondant. Enfin, les points ayant une hauteur inférieure à 1.2 m ont été retirés afin de diminuer l'influence que pourrait avoir sur nos mesures la végétation basse, les rochers, arbres tombés ou autres éléments du sursol. La hauteur de 1.2 m a été déterminée empiriquement et elle correspond à la hauteur de la branche vivante la moins élevée mesurée dans notre échantillon.

4.6 Estimation de la hauteur de la base de la couronne

Il a été démontré qu'en raison des propriétés physiques du lidar, la plus grande partie des impulsions est réfléchiée par les strates les plus denses de la canopée (Popescu et Zhao, 2008; Wang *et al.*, 2008). En d'autres mots, lorsque l'on examine un nuage de points représentant les retours lidar non sol, les zones où l'on observe la plus grande densité de retours devraient concorder avec les sections de la canopée où le feuillage et les branches sont les plus abondantes.

Il est important de noter que la plupart des retours sont interceptés par les branches les plus hautes. Ainsi, la hausse de la densité provoquée par un arbre ou un arbuste sous couvert, par exemple, sera moins marquée que celle associée à la couronne d'un arbre dominant. Enfin, pour un arbre donné, s'il est visible du haut des airs, la chute rapide de la densité de retours suivant le premier maximum, devrait correspondre à la hauteur de la base de sa couronne (Popescu et Zhao, 2008).

Des méthodes basées sur l'examen du nombre de retours lidar par strate de hauteur (histogramme de fréquence) ont été proposées afin d'estimer la hauteur de la base de la couronne (Pyssalo et Hyypä, 2002; Holmgren et Persson, 2004; Popescu et Zhao, 2008; Reitberger *et al.* 2009). Cependant, l'utilisation de strates de hauteur ou d'histogrammes comporte trois problèmes. D'abord, l'apparence du profil des hauteurs généré avec ces méthodes n'est pas lisse (le profil est accidenté). Ensuite, l'allure du profil est fortement dépendante d'une part, du nombre de classes et d'autre part, de leur étendue. Les deux premiers problèmes peuvent être évités si l'on considère la hauteur des retours comme une variable aléatoire continue et qu'on la représente sous la forme d'une fonction. Par exemple, Popescu et Zhao (2008) ont ajusté des fonctions polynomiales de degré 4 à des profils de fréquences lissés afin de déterminer la hauteur de la base de la couronne d'arbres individuels. Aussi, Wang et ses collaborateurs (2008) suggéraient qu'une fonction de densité de probabilité pourrait être utilisée efficacement afin de détecter les strates de végétation. Nous proposons d'utiliser une méthode similaire à celle présentée par Popescu et Zhao (2008) afin d'analyser les profils de densité des hauteurs des points lidar et de déterminer la hauteur de la base de la couronne.

Pour une variable aléatoire continue, on peut associer une probabilité à chaque ensemble de valeurs définies dans un intervalle donné et la probabilité d'observer une valeur spécifique est de 0 (la mesure d'une variable continue est toujours un intervalle). On dénote la probabilité que la variable aléatoire (X) prenne des valeurs comprises dans un intervalle $[a, b]$ par $P(a \leq X \leq b)$. Lorsque l'intervalle s'approche de 0, la valeur prise par X tend alors vers la fonction de densité de probabilité. De par sa nature, la fonction obéit aux deux conditions suivantes. Premièrement, le total des probabilités pour toutes les valeurs possibles de X est toujours 1.

Deuxièmement, les valeurs de P ne peuvent jamais être négatives. En somme, la densité de probabilité est une fonction continue et positive par morceaux. On pourrait dire qu'elle s'apparente, en quelque sorte, à l'histogramme de fréquence.

Dans le cadre de cette recherche, nous utiliserons une méthode d'estimation de la densité non paramétrique par noyaux (« *Kernel density estimator* ») de forme gaussienne pour dresser nos profils de densité. Les avantages de ce choix sont qu'aucune supposition a priori quant à la distribution des données n'est nécessaire et que la force du lissage de la courbe de densité peut être contrôlée en modifiant les paramètres du noyau. La méthode consiste à centrer un noyau (« *kernel* »), décrit par une forme fonctionnelle (K) et un paramètre d'étendue (h), sur chacune des observations (x_i). La densité estimée à un point X est proportionnelle à la somme des contributions de tous les x_i , et la contribution de chacun des x_i à $p(x)$ dépend de sa distance par rapport à X . Les équations pour l'estimer la densité et pour déterminer la valeur de K , dans le cas où le noyau a une forme gaussienne, sont présentées plus bas (Équations 4.1 et 4.2).

Équation 4.1 Estimation de la densité

$$\hat{p}(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right)$$

Équation 4.2 Valeur du paramètre K

$$K(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}x^2}$$

Cela dit, s'il est généralement reconnu que la forme retenue pour le noyau a peu d'impact sur l'estimation de la densité, la valeur utilisée pour son étendue (h) est d'une importance critique (Sheather, 2004). En effet, c'est ce paramètre qui a le plus d'impact sur la force du lissage de la fonction. Si la valeur (h) utilisée est trop petite, la fonction de densité sera trop sensible au bruit, alors que si cette valeur est trop grande, des traits essentiels de la structure des données (ex. multimodalité) risquent d'être supprimés.

De nombreux statisticiens se sont penchés sur le problème du choix d'une valeur optimale pour l'étendue du noyau (h). Afin de trouver cette valeur, il est nécessaire sélectionner une méthode permettant d'évaluer la performance de l'estimation de la densité. La moyenne de l'erreur quadratique intégrée est généralement reconnue comme une mesure de performance acceptable (Heidenreich *et al.* 2010). Par conséquent, la méthode de sélection de l'étendue optimale que nous avons retenue pour ce travail, soit la méthode du « *plug-in* » par résolution d'équations de Sheather-Jones, est basée sur la minimisation de cette mesure (Sheater et Jones, 1991).

Le logiciel de statistique R est utilisé pour dresser un profil de densité pour chacun des individus à l'étude. Dans le logiciel R, la fonction *density()* permet d'estimer la densité avec la méthode des noyaux. Par défaut, la forme du noyau est gaussienne et son étendue peut être imposée par l'argument "*bw=*". La librairie MASS comporte une fonction (*bw.sj*) permettant d'obtenir, pour un vecteur de données, la taille optimale du noyau selon la méthode du « *plug-in* » de Sheater-Jones. La valeur obtenue grâce à cette fonction sera utilisée comme étendue. Théoriquement, la chute de fréquence ou d'intensité, donc la base de la couronne, devrait correspondre à la première inflexion de la courbe suivant son maximum (Popescu et Zhao, 2008). Notre mesure de la hauteur de la base de la couronne par lidar sera donc obtenue en analysant les profils de densité afin d'extraire la hauteur de cette inflexion.

4.7 Méthode d'analyse des résultats

Afin de pouvoir visualiser et apprécier nos résultats qualitativement, un graphique montrant le nuage de points lidar, la fonction de densité de probabilité ainsi que les hauteurs estimées et mesurées sur le terrain est produit pour chacun des individus. Il a été suggéré que dans certains cas, soit lorsque la distribution de la densité est complexe, la taille du noyau optimale calculée avec la méthode retenue (*plug-in* de Sheather-Jones) est parfois trop grande, ce qui peu engendrer un lissage exagéré (Heidenreich *et al.* 2010). Afin de permettre une comparaison entre le profil utilisé pour estimer la hauteur de la base de la couronne et le profil de densité que nous obtiendrions avec un noyau plus étroit, une courbe plus détaillée,

dont la taille du noyau a été calculée par la méthode de la validation croisée (« *least square cross validation* », *LSCV*), est ajoutée à nos analyses.

Pour chacun des individus composant notre échantillon ($n=45$), l'écart entre la mesure lidar et la mesure terrain est calculée. Les statistiques descriptives de base (minimum, maximum, étendue, médiane, moyenne, variance, écart-type) sont extraites. Le biais, l'écart moyen et l'écart-type sont calculés pour l'ensemble de notre échantillon, ainsi que pour les trois espèces à l'étude ($n_{\text{esp}}=15$). Nous utilisons une stratégie de randomisation (*bootstrap*) afin de produire une meilleure estimation du biais et une estimation de l'erreur-type (SE). Des histogrammes et un diagramme de Tukey (*box and whisker plot*) sont utilisés pour visualiser la distribution des écarts.

Afin de quantifier la relation entre les mesures obtenues avec notre méthode et les données terrains, nous utilisons les coefficients de détermination (R^2) et des modèles linéaires. Puisque l'ajustement du modèle aux données est satisfaisant, il pourra être utilisé pour corriger les mesures obtenues avec la méthode proposée afin d'arriver à une estimation plus précise de la hauteur de la base de la couronne. Des méthodes graphiques (diagramme quantile-quantile, résidus de Student en fonction des valeurs prédites, effet de levier et distance de Cook montrant l'influence des observations) sont utilisées afin de vérifier comment le modèle s'ajustait aux données et de repérer les mesures extrêmes risquant de le déséquilibrer. Nous avons ensuite produit un second modèle en excluant ces valeurs extrêmes.

Enfin, des simulations de Monte Carlo (*bootstrap* paramétrique) sont utilisées. Le principe des simulations est de générer, un grand nombre de fois, des données qui suivent réellement un modèle et de comparer ces données théoriques à l'échantillon de données observées. Dans le cas présent, on compare la valeur de la hauteur de la base de la couronne prédite par lidar à celle mesurée sur le terrain. On utilise les simulations afin d'évaluer l'ajustement du modèle en comparant les sommes du carré des écarts (SSE) simulées et observées. On les utilise également pour estimer plus précisément la moyenne et l'erreur-type sur les estimés du

modèle (beta et ordonnée à l'origine). Elles nous permettent d'obtenir un modèle plus robuste.

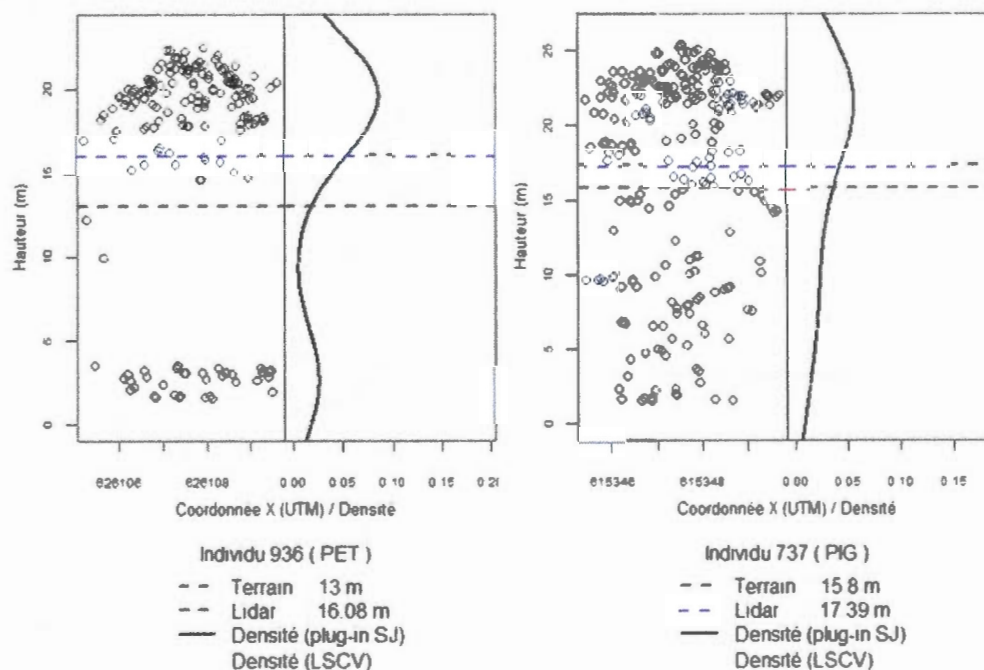
CHAPITRE V

RÉSULTATS

5.1 Visualisation des résultats

L'ensemble des graphiques permettant de visualiser nos résultats et les nuages de points extraits sont présentés en annexe (Annexe A). Pour l'ensemble des individus, la quantité de retours dans les nuages de points varie énormément. La comparaison visuelle des profils de densité lissés avec un noyau dont la taille est déterminée avec la méthode du *plug-in* de Sheather-Jones (utilisée pour l'étude) à ceux où elle est calculée avec la méthode de la validation croisée nous permet de constater que la force du lissage utilisé est généralement appropriée. Dans la plupart des cas, le lissage semble suffisant pour éliminer le bruit et assez fin pour que les traits essentiels de la distribution de la hauteur des points soient bien représentés. Parfois, la mesure estimée par lidar est très près de la mesure terrain alors que dans d'autres cas elle est plutôt éloignée. À première vue, la complexité d'un nuage de points ne semble pas nécessairement expliquer la précision de notre estimation (exemple: individus 936 et 737, Figures 5.1 et 5.2)

En examinant les graphiques par espèce, on remarque d'abord que pour les peupliers faux-trembles, on observe souvent une démarcation très nette entre les retours provoqués par la couronne de l'arbre et ceux attribuables à des éléments sous son couvert. On dénote également une concentration des retours près de la cime. Par conséquent, les profils lissés montrent une forte augmentation de la densité de retour dans la partie supérieure des arbres. On note également que les individus composant l'échantillon de peupliers présentent des hauteurs plus homogènes que celles des deux autres espèces.



Figures 5.1 et 5.2 Profils des échantillons 936 et 737.

La complexité du nuage de point n'est pas nécessairement liée à la mesure obtenue par lidar (PET: peuplier faux-tremble, PIG: pin gris).

Pour tous les peupliers de l'échantillon, la hauteur de la base de la couronne est surestimée. Pour les épinettes blanches, la distribution plus uniforme des retours sur toute la hauteur de l'arbre produit des profils de densité lissés moins complexes que pour les autres espèces. Ils sont souvent unimodal et les maximums de densité semblent être atteints entre 50% et 75% de la hauteur. Les hauteurs de la base de la couronne mesurées sur le terrain pour cette espèce sont en moyenne beaucoup moins élevées que pour les autres espèces et sous-estimée pour 53% des arbres échantillonnés. Enfin, l'augmentation de la densité vers le sommet est moins marquée sur les profils générés pour les pins gris que ce que l'on observe pour les peupliers. La diminution de la densité après le maximum est aussi beaucoup plus graduelle. Dans 67% des cas, on constate une surestimation de la hauteur de la base de la couronne. Les mesures acquises sur le terrain, les estimations extraites des données lidar et les écarts entre ces deux valeurs sont synthétisés dans les Tableaux 5.1, 5.2 et 5.3.

Tableau 5.1 Hauteur de la base de la couronne des épinettes blanches

Épinettes blanches (EPB)			
Individu	Mesure terrain (m)	Valeur estimée (m)	Écart (m)
164	3.95	3.13	0.82
549	2.54	0.36	2.18
552	3.60	8.49	-4.89
758	6.74	7.98	-1.24
844	4.69	6.77	-2.08
846	5.85	5.32	0.53
853	4.44	8.25	-3.81
855	4.35	2.44	1.91
861	5.53	7.78	-2.25
869	4.20	1.67	2.53
873	4.93	6.66	-1.73
899	5.33	2.65	2.68
900	3.52	2.91	0.61
920	2.40	0.80	1.60
938	2.71	5.79	-3.08

Tableau 5.2 Hauteur de la base de la couronne des peupliers faux-trembles

Peupliers faux-trembles (PET)			
Individu	Mesure terrain (m)	Valeur estimée (m)	Écart (m)
874	13.50	15.19	-1.69
916	16.50	19.78	-3.28
917	11.00	16.83	-5.83
923	13.10	18.60	-5.50
929	13.80	15.58	-1.78
930	15.30	16.03	-0.73
932	13.90	15.88	-1.98
934	13.30	14.51	-1.21
936	13.00	16.08	-3.08
939	10.20	14.29	-4.09
950	13.70	15.41	-1.71
951	13.80	14.05	-0.25
952	10.20	19.53	-9.33
954	15.70	15.76	-0.06
968	13.70	15.57	-1.87

Tableau 5.3 Hauteur de la base de la couronne des pins gris

Pins Gris (PIG)			
Individu	Mesure terrain (m)	Valeur estimée (m)	Écart (m)
162	5.70	4.98	0.72
165	4.25	2.72	1.53
167	7.00	3.21	3.79
508	11.70	13.76	-2.06
544	11.70	12.18	-0.48
545	10.40	12.41	-2.01
576	9.90	13.25	-3.35
629	12.00	16.69	-4.69
630	15.20	14.61	0.59
681	16.50	16.88	-0.38
737	15.80	17.39	-1.59
742	14.80	16.07	-1.27
476	13.30	19.02	-5.72
759	15.50	12.02	3.48
760	12.50	16.76	-4.26

5.2 Statistiques descriptives

Pour l'ensemble des individus, les écarts minimum et maximum sont de -9.33 et 3.79 m. L'étendue est de 13.12 m avec un écart moyen de 5.54 m. La médiane des écarts est de -1.69 m. La moyenne des écarts entre les valeurs estimées et observées (biais) est de -1.43 m. On observe une variance sur les écarts de 7.48 m. et un écart-type de 2.73 m. La valeur du biais et l'erreur-type, estimés par *bootstrap* avec 1000 simulations, sont de -1.42m (biais) et 2.69m (SE) (Tableau 5.4). Les biais et les écarts-types pour chacune des trois espèces à l'étude sont présentés dans le Tableau 5.5.

Tableau 5.4 Statistiques descriptives des écarts entre les mesures terrains et les valeurs obtenues par l'analyse des profils de densité

Statistiques	Valeurs (m)
Minimum	-9.33
Maximum	3.79
Étendue	13.12
Écart moyen	5.54
Médiane	-1.69
Moyenne	-1.43
Variance	7.48
Écart-type	2.73

Estimées par Bootstrap	Mesures (m)
Biais	-1.42
Erreur-type	2.69

Tableau 5.5 Biais et écart-type, par espèce

Espèce	Biais (m)	Écart-type (m)
Épinettes blanches	-0.41	2.47
Peupliers faux-trembles	-2.83	2.49
Pins Gris	-1.05	2.80

L'examen des histogrammes de fréquences (Figure 5.3) révèle que globalement, la distribution des écarts semble suivre une distribution normale avec une légère asymétrie vers la gauche. On remarque que pour une des observations, nous avons un écart négatif très fort entre l'estimation lidar et la mesure terrain. En examinant les résultats par espèce, on note que tous les écarts calculés sur les peupliers faux-trembles sont négatifs et que la majorité se concentrent dans l'intervalle de -2 à 0 m. Pour les épinettes blanches seulement, la distribution des écarts semble bi-modale avec une tendance à obtenir soit une faible sous-estimation de la hauteur (0 à 2 m), soit une surestimation un peu plus importante (-4 à -2 m). Quant aux pins gris, la distribution des écarts semble être près de la normalité avec une proportion plus forte d'écarts négatifs.

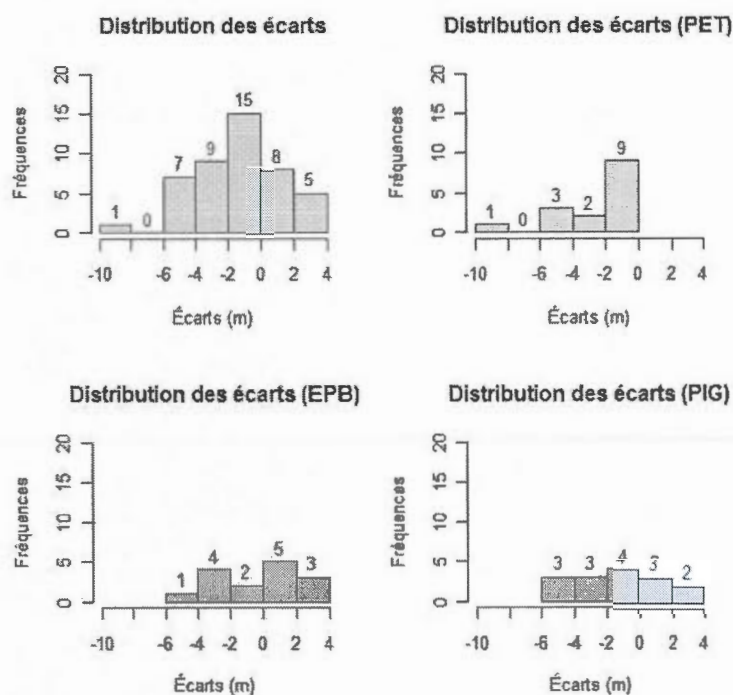


Figure 5.3 Histogrammes de fréquences des écarts pour tous les individus et par espèce

Le diagramme de Tukey (Figure 5.4) permet de discerner que le nombre de sous-estimation versus le nombre de surestimation semble différer selon l'espèce. Dans le cas des peupliers faux-tremble (PET) et des pins gris (PIG), la plus grande partie des écarts sont négatifs. La mesure terrain est presque systématiquement plus basse que notre estimation. Pour les épinettes blanches, les écarts semblent répartis assez également entre le positif et le négatif et la médiane est légèrement supérieure à 0 (plus de 50% des écarts sont positif). On remarque que la boîte (et ses moustaches) tracée pour les peupliers est plus compacte que celle des deux espèces de conifères. L'étendue des écarts de l'estimation semble plus réduite pour cette espèce que pour les deux autres. Cependant, les estimations paraissent plus systématiquement biaisées négativement que pour les deux autres espèces. Pour les peupliers, une observation tombe radicalement en dehors des marges (percentiles 5 et 95); il pourrait s'agir d'une mesure extrême.

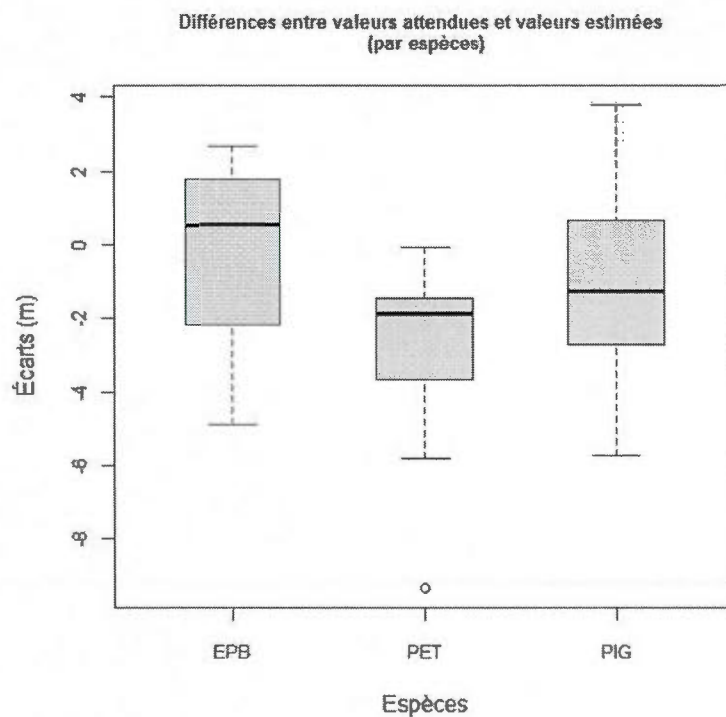


Figure 5.4 Différences entre valeurs attendues et valeurs estimées (par espèce).

La ligne noire correspond à la médiane, la base et le sommet de la boîte aux percentiles 25 et 75, les moustaches aux percentiles 5 et 95

5.3 Modélisation

Le résumé des résultats du modèle linéaire, obtenus avec le logiciel R est présenté dans le Tableau 5.6.

Tableau 5.6 Résultats du modèle linéaire

Équation: *mesure terrain ~ estimation lidar + ordonnée à l'origine*

Coefficients:

	Estimé	Erreur type	Valeur de p
Ordonnée à l'origine	1.93	0.67	0.006
Estimation lidar	0.70	0.05	< 2e-16

R^2 : 0.80

RMSE: 2.05

Le coefficient de détermination du modèle (R^2) est de 0.80 ce qui signifie que les estimations lidar permettent d'expliquer 80,48% de la variance des observations terrain. Avec un niveau de confiance de 95%, on peut conclure à une relation significative entre les estimations lidar et les mesures terrains ($p < 2e-16$). La moyenne quadratique des erreurs (RMSE, distance moyenne des estimations à la droite de régression, calculée entre les valeurs prédites et les mesures terrains) est de 2.05 mètres. Les résultats du modèle sont représentés graphiquement par la Figure 5.5. Les graphiques permettant de vérifier l'ajustement du modèle sont présentés à la Figure 5.6.

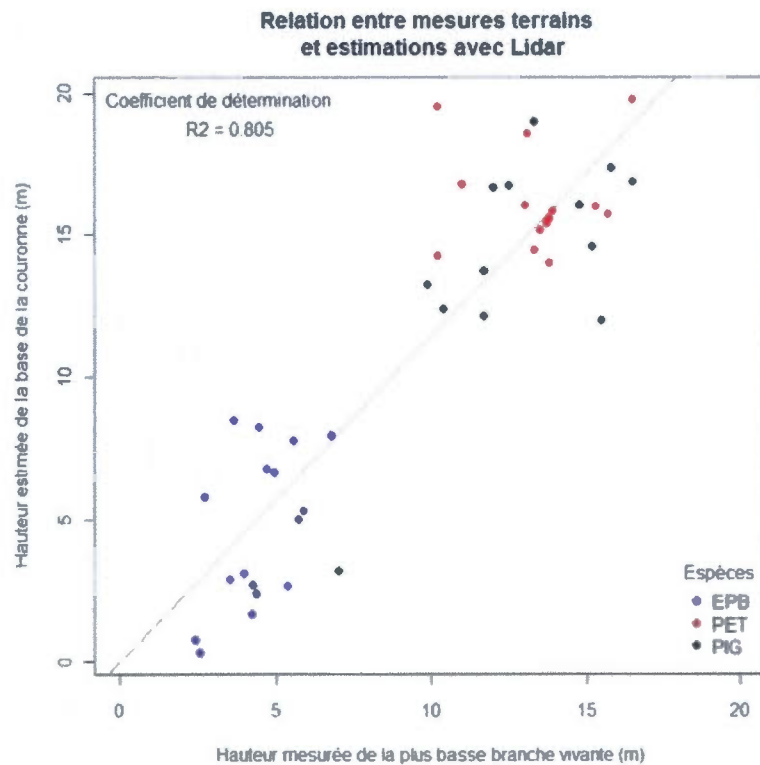


Figure 5.5 Relation entre mesures terrains et estimations avec Lidar.

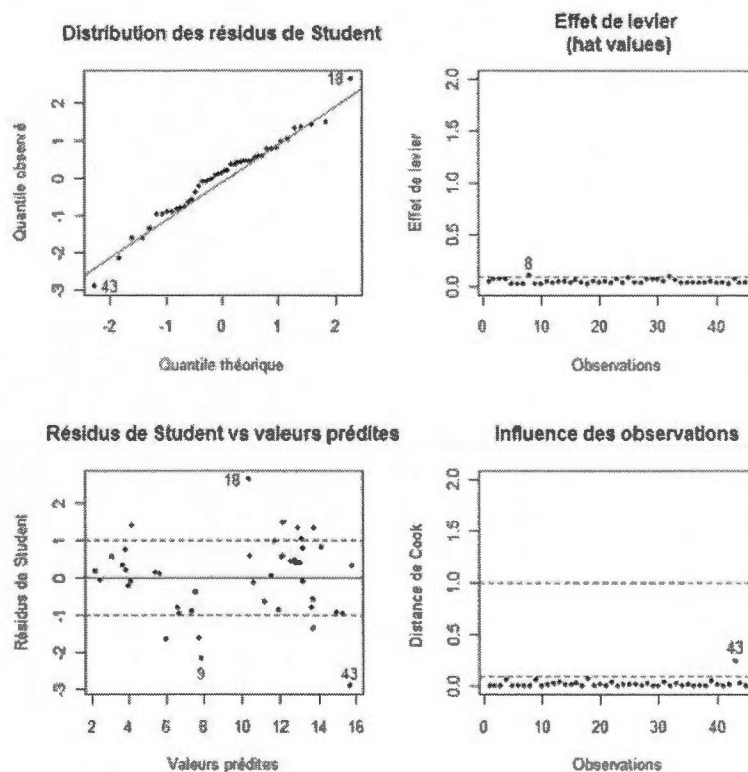
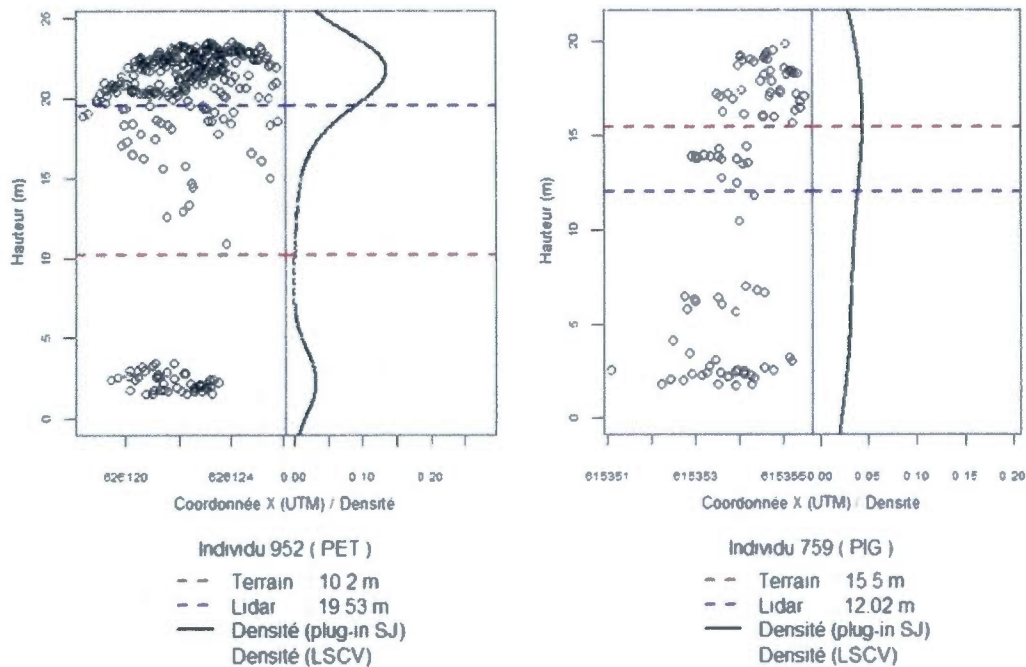


Figure 5.6 Vérification de l'ajustement du modèle.

Le graphique montrant la distribution des résidus de Student nous permet de constater que leur distribution semble assez près de la normalité. Seulement deux observations (18 et 43) semblent dévier de la normalité. Sur le graphique des résidus en fonction des valeurs prédites, on peut remarquer que la variance est assez homogène (avec quelques valeurs extrêmes) et qu'il ne semble pas y avoir de patron dans la distribution des résidus. Les deux observations anormales (18 et 43) présentent de très forts résidus normalisés (supérieur à 2 ou inférieur à -2). Quant à l'effet de levier, aucune des observations ne dépasse significativement le seuil fixé (2 fois la moyenne des valeurs de la diagonale de la *hat matrix* (Belsley *et al.*, 1980)), risquant d'avoir un effet démesuré sur la droite de régression. Enfin, selon les distances de Cook calculées, une seule observation pourrait avoir une influence importante sur les coefficients de régression. La distance de Cook pour cette observation (43) dépasse le seuil calculé ($D_i > 4/(n-p)$) (selon Bollen et Jackman, 1992). Toutefois, elle est largement

inférieure au seuil critique ($D_i > 1$, suggéré par Cook et Weisber, 1982) et ne pose probablement pas un grave problème.

En somme, les observations 18 et 43, soit les individus 759 et 952 pourraient être des mesures extrêmes et avoir une influence négative sur la qualité de notre modèle. Sur les graphes que nous avons préparés pour ces individus, on remarque que dans le cas de l'individu 952, la mesure terrain est largement plus basse que l'estimation lidar. Dans le cas de l'individu 759, on dénote l'opposé, la mesure terrain est plus élevée.



Figures 5.7 et 5.8 Représentation graphique des deux individus (952 et 759) identifiés comme étant des cas de mesure extrême.

Le biais et l'erreur type, recalculés par *bootstrap* (1000 simulations) en faisant abstraction des mesures extrêmes sont présentés plus bas et comparé avec les résultats initiaux (avec valeurs extrêmes) (Tableau 5.7). Le biais sans les deux valeurs extrêmes est de -1.37 m avec une erreur-type de 2.36 m. Les résultats pour le second modèle, sans les valeurs extrêmes, sont présentés dans le tableau 5.8.

Tableau 5.7, Biais et erreur type (SE)
calculés par *bootstrap* avec et sans les valeurs extrêmes

Résultats du Bootstrap		
	Résultats initiaux (m)	Résultats sans les valeurs extrêmes (m)
Biais	-1.42	-1.37
SE	2.69	2.36

Tableau 5.8 Résultats du second modèle linéaire, sans les valeurs extrêmes

Équation: <i>mesure terrain</i> ~ <i>estimation lidar</i> + <i>ordonnée à l'origine</i>			
Coefficients:			
	Estimé	Erreur type	Valeur de <i>p</i>
Ordonnée à l'origine	1.63	0.58	0.007
Estimation lidar	0.73	0.05	< 2e-16
R²: 0.86			
RMSE: 1.75			

Si on compare avec les résultats originaux, la relation entre les estimations lidar et les mesures terrains demeure à peu près identique, donc très significative ($p < 2e-16$, avec un niveau de confiance de 95%). Le coefficient de détermination du second modèle est légèrement plus élevé ($R^2 = 0.86$) que celui du modèle comprenant toutes les données (0.80). Les résultats graphiques sont représentés par les Figures 5.9 et 5.10. Comme dans le cas du modèle initial, la distribution des résidus de Student semble assez près de la normalité et le postulat d'homoscédasticité semble respecté (la variance paraît homogène). Par contre, contrairement au modèle incluant toutes les données, aucune des observations ne dépasse significativement les seuils fixés pour l'effet de levier ou pour la distance de Cook. Donc, en choisissant de ne pas tenir compte des deux valeurs extrêmes, il n'y a plus d'observations pouvant avoir une influence démesurée sur les coefficients du modèle.

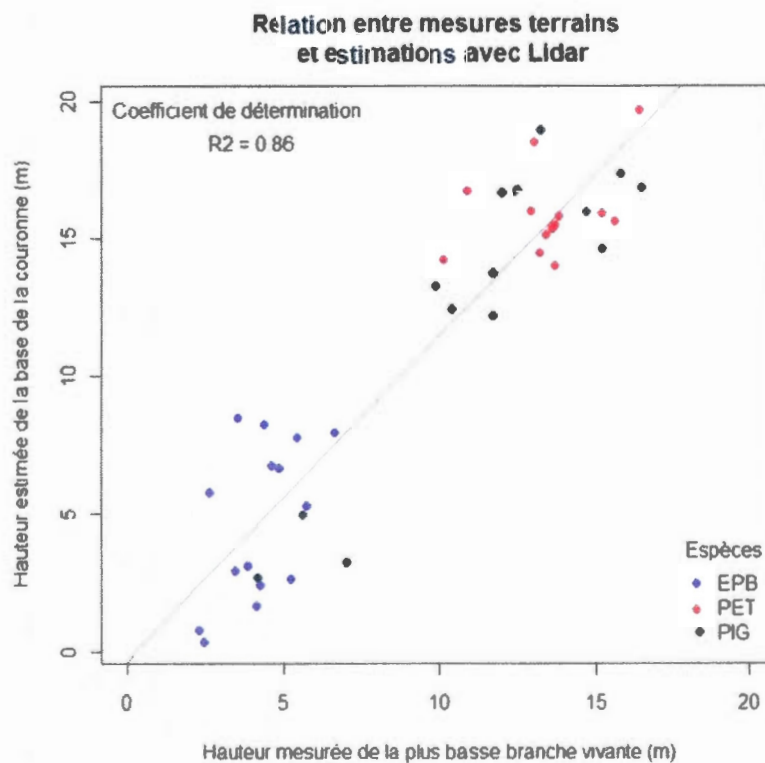


Figure 5.9 Relation entre mesures terrains et estimations avec Lidar (excluant les valeurs extrêmes).

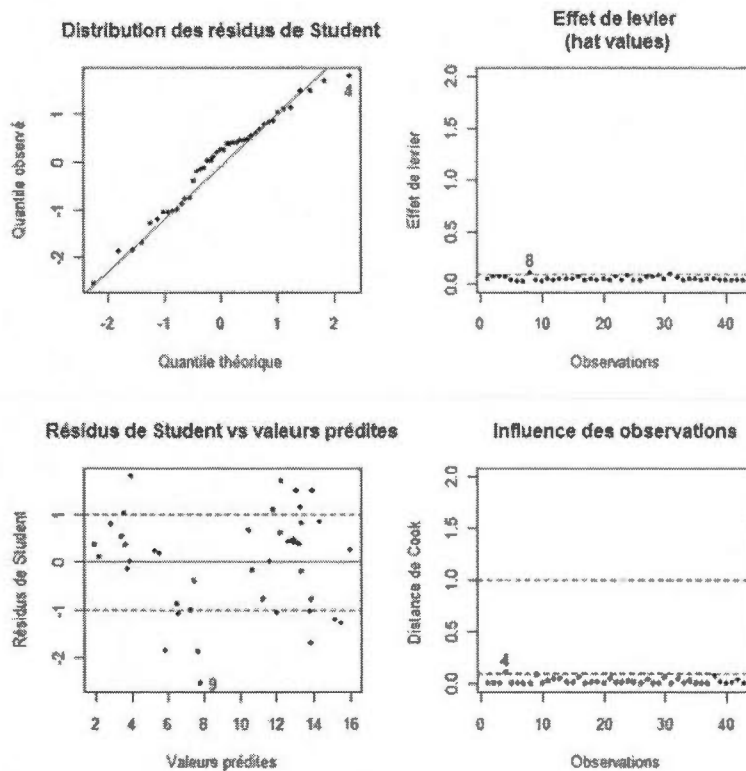


Figure 5.10 Vérification de l'ajustement du modèle (excluant les valeurs extrêmes).

Le Tableau 5.9 et la Figure 5.11 présentent un résumé des résultats du modèle linéaire global et des modèles calculés séparément pour chacune des trois espèces composant l'échantillon à l'étude. On remarque que pour les pins gris, on obtient une bonne corrélation entre nos estimations et la mesure terrain. En effet, 81% de la variance de la mesure terrain peut être expliqué par notre estimation ($R^2 = 0.81$). La valeur de p du modèle est très faible ($1.26e-05$), ceci nous permet de conclure qu'il y a une relation fortement significative entre les deux variables (avec un niveau de confiance de 95%). La valeur du RMSE est de 2.17 m, elle est la plus élevée parmi les espèces à l'étude. Dans le cas des épinettes blanches, le coefficient de détermination est peu élevé (0.27), indiquant une très faible corrélation entre les mesures terrains et lidar. Le RMSE obtenu pour cette espèce est de 1.04 m. Les résultats du modèle

linéaire suggèrent tout de même une relation significative ($p = 0.05$) entre ces deux variables. À première vue, nos estimations pour le peuplier faux-tremble ne semblent pas être bien corrélées avec les mesures terrain. Seule une faible part de la variance des mesures terrain semble explicable par ces estimations ($R^2 = 0.15$). Avec un seuil de 95%, la valeur du p de Wald obtenue pour le modèle (0.18) ne nous permet pas de conclure à une relation significative entre nos estimations et les mesures terrain. Cependant, le RMSE est relativement peu élevé (1.46 m) et on remarque que la répartition de nos données autour de la droite de régression semble inégale.

Tableau 5.9 Résumé des résultats des modèles (global et par espèce)

Résultats des modèles			
Modèle	p de Wald	Coefficient de détermination (R^2)	RMSE
Global	2e-16	0.86	1.75
Pin gris (PIG)	1.26e-05	0.81	2.17
Épinette blanche (EPB)	0.05	0.27	1.04
Peuplier faux-tremble (PET)	0.18	0.15	1.46

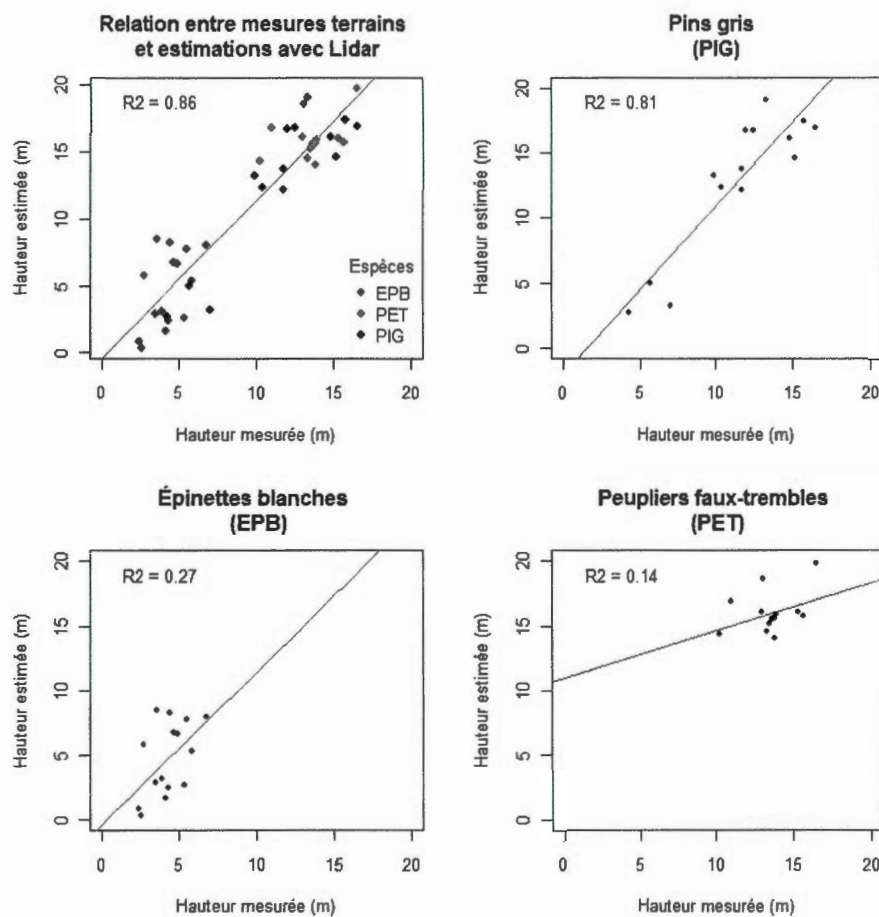


Figure 5.11 Résultats des modèles, global et par espèce.

5.4 Simulations

Selon les résultats obtenus avec les simulations de Monte Carlo (1000 simulations), la probabilité d'observer une somme de carrés des écarts simulée égale ou supérieure à celle observée (131.50) est d'environ 51% ($P=0.513$) (Figure 5.12). L'hypothèse nulle, soit que le second modèle (sans valeurs extrêmes) s'ajuste bien aux données, est donc vérifiée; l'ajustement est satisfaisant. Ceci suggère que le modèle est approprié pour modéliser les données.

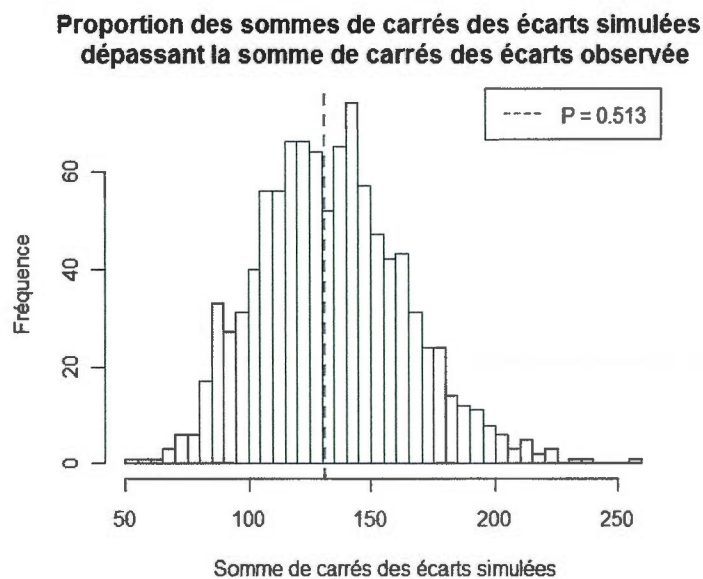


Figure 5.12 Évaluation de l'ajustement du second modèle.

Les simulations de Monte Carlo ont également été utilisées afin de vérifier l'exactitude des paramètres (estimés) de notre second modèle. Les résultats, calculés comme la moyenne des estimations des simulations, sont très près des valeurs originales du modèle (Tableau 5.10). La valeur moyenne de l'ordonnée à l'origine, arrondie, est de 1.66 avec une erreur type de 0.58. Quant à la valeur de l'estimé pour les mesures terrain, elle est de 0.73 avec une erreur type de 0.05.

Tableau 5.10 Une évaluation plus robuste pour les estimés du second modèle

Modèle initial		Estimé	Erreur type
	Ordonnée à l'origine	1.63	0.58
	Estimation lidar	0.73	0.05
Moyenne des simulations			
	Ordonnée à l'origine	1.66	0.58
	Estimation lidar	0.73	0.05

CHAPITRE VI

DISCUSSION

Avant de comparer plus finement nos résultats avec ceux présentés dans d'autres publications, il est essentiel de spécifier qu'une comparaison directe des résultats chiffrés s'avère très délicate. En effet, les paramètres des différentes expériences varient considérablement. La méthodologie, le territoire à l'étude (type de milieu, topographie), les espèces constituant l'échantillon, la densité du peuplement, l'appareil lidar utilisé et les spécifications du survol sont autant de facteurs pouvant influencer les résultats. De plus, les indicateurs choisis pour évaluer ces résultats (biais, écart-type, coefficient de détermination ou de corrélation, RMSE) diffèrent considérablement d'une publication à l'autre. Le Tableau 6.1 contient les coefficients de détermination et la moyenne quadratique des erreurs (RMSE) que nous avons obtenus ainsi que ceux publiés dans cinq autres études, sélectionnées pour leur utilisation d'indicateurs semblables à ceux que nous avons calculés. Les espèces échantillonnées sont également présentées dans ce tableau.

En ce qui concerne les données lidar, pour toutes les études recensées dans le Tableau 6.1, à l'exception de celle de Holmgren *et al.* (2008), seul les premiers retours ont été utilisés. Dans le cas de Holmgren *et al.* (2008), les données comprenaient les premiers et derniers retours. Le nombre de retours lidars non classifiés sol par mètre carré (retours/m²) de chacune des études avec lesquelles nous comparons nos résultats est présenté dans le Tableau 6.2. Dans l'article de Holmgren et Persson (2004), le nombre de retour/m² n'est pas spécifié mais, en nous basant sur leur description des données lidar (distance moyenne de 0.44 mètre entre les points au sol), on suppose qu'il serait d'environ 3 à 10 retours/m². Le capteur employé (ALTM 3100) pour notre recherche permet l'enregistrement de retours intermédiaires. La

quantité de premiers retours par mètre carré est d'environ 7.4, le nombre affiché dans le Tableau 6.2 (13.4 retours/ m²) inclut les retours intermédiaires.

Tableau 6.1 Comparaison entre les résultats présentés et ceux d'autres études

Publications	Espèces à l'étude	Coefficient de détermination (R ²)	RMSE (m)
Dans le cadre de cette étude	Global	0.86	1.75
	Pins gris	0.81	2.17
	Peuplier faux-trembles	0.27	1.04
	Épinettes blanches	0.15	1.46
Holmgren et Persson (2004)	Épinettes de Norvège et pins sylvestres	0.71	2.82
Solberg <i>et al.</i> (2006)	Épinettes de Norvège	0.20	3.50
Popescu et Zhao (2008)	Global	0.80	2.03
	Pins	0.79	2.03
	Feuillus (espèces non spécifiées)	0.74	1.88
Holmgren <i>et al.</i> (2008)	Épinettes de Norvège, pins sylvestres et bouleaux	0.82	N.D.
Kato <i>et al.</i> (2009)	Conifères (grande variété d'espèces)	0.92	1.62
	Feuillus (grande variété d'espèces)	0.53	2.23

Tableau 6.2 Comparaison entre la densité de retours utilisés et celles des autres études avec lesquelles les résultats sont comparés

Publications	Nombre de retours non classifiés sol par mètre carré (moyenne approximative, retours/m ²)
Dans le cadre de cette étude	13.4
Holmgren et Persson (2004)	3 à 10
Solberg <i>et al.</i> (2006)	5
Popescu et Zhao (2008)	2.6
Holmgren <i>et al.</i> (2008)	10 à 20
Kato <i>et al.</i> (2009)	50

À la lumière des résultats répertoriés, on remarque que la précision des mesures issues de la méthode présentée semble similaire ou même légèrement supérieure à celle obtenue par d'autres auteurs. Différentes hypothèses peuvent être émises pour expliquer la relation plus

forte et le faible RMSE obtenu (lorsque l'on examine nos résultats globaux, sans séparer les espèces).

De prime abord, il semble raisonnable de croire que la densité des retours lidar ou le fait de disposer de retours intermédiaires puisse avoir une influence positive sur la capacité à mesurer la hauteur de la base de la couronne. Ainsi la densité supérieure de retours dont nous disposons expliquerait la force de nos résultats. Cependant, des auteurs ayant eu recours à des données lidar d'une densité de retours beaucoup plus faible (Popescu et Zhao, 2008) ont obtenu, eux aussi, des résultats très satisfaisants. Avec les données dont nous disposons, nous ne pouvons donc ni affirmer ni infirmer cette hypothèse. Si l'on voulait la tester formellement, on pourrait réduire artificiellement la densité des retours, répéter l'expérience présentée ici et comparer les résultats. Pour déterminer l'apport des retours intermédiaires, l'expérience proposée dans le cadre de cette recherche pourrait être répétée en utilisant seulement les premiers retours. En procédant ainsi, on réduirait le nombre de paramètres pouvant affecter les résultats et l'on pourrait mieux évaluer l'effet de la densité des retours.

Ensuite, il est possible que la méthode proposée performe légèrement mieux que celles utilisées par d'autres. Selon les études comparatives sur les méthodes de mesure de la hauteur de la base de la couronne par lidar publiées récemment par Maltamo *et al.* (2010) et Vauhkonen (2010), les méthodes basées sur l'analyse du profil vertical des points, telle que celle présentée, produisent généralement les meilleurs résultats. De plus, il est reconnu que les estimations lidar ont tendance à surestimer la hauteur de la base de la couronne. Or, le lissage appliqué sur les profils de densité de hauteur compense une partie de ce biais et il semble en résulter des estimations un peu plus exactes que ce que nous obtiendrions avec d'autres méthodes. Pour mieux évaluer la performance de la méthode, il serait nécessaire de la tester sur d'autres jeux de données et d'essayer d'autres méthodes sur nos données afin de comparer les résultats.

Il est important de spécifier que le fait que les valeurs des R^2 soient relativement basses pour les peupliers et les épinettes (0.27 et 0.15) ne signifie pas nécessairement que la méthode proposée performe mal pour ces espèces. Elles peuvent être expliquées par la faible variance

des valeurs de référence (la hauteur des bases de couronnes mesurée varie peu pour ces deux espèces). Ceci explique également la forte valeur du p de Wald (0.18) obtenue pour le modèle des peupliers faux-trembles. Par ailleurs, la faiblesse des RMSE correspondants indique que la plupart des valeurs prédites par le modèle linéaire sont très près de la droite de régression.

En utilisant une stratégie de randomisation avec remise (*bootstrap*), un biais de -1.42 m et une erreur-type de 2.69 m ont été obtenus dans cette étude. Deux cas où les auteurs présentent ces indicateurs, et avec lesquels il semble pertinent de comparer nos résultats, sont présentés dans les prochaines lignes.

Dans un article ne portant pas spécifiquement sur la mesure de la hauteur de la base de la couronne, une méthode basée sur l'analyse de l'histogramme de fréquence a permis à Pyysalo et Hyypä (2002) d'obtenir un biais de -3.0 m et écart type de 4.0 m. L'échantillon de 50 arbres analysés par les auteurs était composé de pins sylvestres, d'épinettes de Norvège et de bouleaux. La densité de premiers retours lidars était d'environ 10 retours/m². Puisque la densité de retours est similaire et que l'étude a aussi été conduite dans un milieu naturel et en forêt mixte, il est possible que les différences relativement importantes de biais et d'écart type avec nos résultats puissent s'expliquer par la méthode utilisée et par le fait de disposer de retours intermédiaires. Les retours intermédiaires apportent un surplus d'information sur la distribution spatiale des éléments à l'intérieur de la canopée. Ainsi, il est possible que les points supplémentaires extraits soient plus près de la base de la couronne et contribuent à obtenir une mesure plus précise. La qualité de l'appariement entre les mesures terrain et lidar pourrait également expliquer en partie la différence observée puisque les spécimens constituant l'échantillon de Pyysalo et Hyypä ont été segmentés automatiquement et que les auteurs ne semblent pas avoir utilisé une méthode aussi précise que la nôtre pour le positionnement des données terrain.

Parmi les différentes méthodes présentées dans son étude comparative, Vauhkonen (2010) a testé une méthode basée sur l'analyse du profil vertical de hauteur similaire à celle publiée par Popescu et Zhao (2008), donc similaire celle présentée ici. Les données de l'étude proviennent d'une plantation de pins sylvestres et la densité de retours lidar est de 4

retours/m². L'auteur rapporte un biais de 0.34 m et un RMSE de 1.76 m. Dans notre cas, pour les pins gris, un biais de -1.05 m et un RMSE de 2.17 m ont été calculés. Les résultats obtenus par Vauhkonen semblent donc un peu plus exact. Il est intéressant de noter que la densité de retours est beaucoup plus faible que celle dont nous disposions. Ceci pourrait constituer un argument en faveur de l'hypothèse que la densité ne soit pas un facteur déterminant en ce qui concerne la précision de la mesure de la base de la couronne. Cependant, le fait que cette étude aie été menée sur un peuplement monospécifique et aménagé pourrait avoir une influence sur la qualité des mesures. Par exemple, on peut supposer que dans ce type de milieu, il y aurait moins de compétition interspécifique et moins de cas où des couronnes d'arbres d'espèces différentes sont imbriquées. Enfin, on peut supposer que l'espèce pourrait avoir une influence sur la précision de la mesure. En effet, bien que les espèces mesurées soient deux espèces de pins, leur silhouette habituelle, typique, est relativement différente (Figure 6.1). Par ailleurs, Popescu et Zhao (2008) ont démontré que l'espèce pouvait avoir une influence significative sur la précision des mesures. Dans leur cas, seuls des pins et des feuillus étaient comparés, mais à la lumière de nos résultats, il semble raisonnable d'avancer qu'une différence puisse exister entre les espèces de conifères et de feuillus.

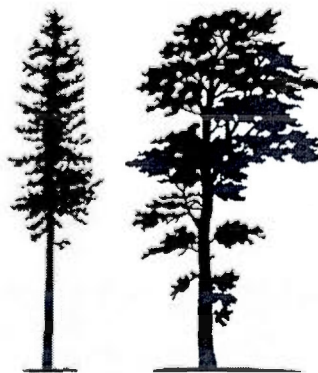


Figure 6.1 Comparaison entre la silhouette d'un pin gris (à gauche) et d'un pin sylvestre (à droite).
Source:[Enligne] <http://www.arboquebecium.com>

Les chercheurs ayant publié sur le sujet de la mesure de la hauteur de la base de la couronne constatent que généralement, la hauteur obtenue avec le lidar surestime celle mesurée sur le terrain. Lorsque l'on observe nos résultats globalement, toutes espèces confondues, nous constatons également cette tendance à surestimer la hauteur par rapport aux données de références. Cependant, si l'on observe les histogrammes (Figure 5.3) et le diagramme de Tukey (Figure 5.4), on remarque que cette tendance à surestimer la mesure semble différer selon l'espèce. Si 100% des mesures lidar sont surestimées dans le cas des peupliers, 67% le sont pour les pins et 47% pour les épinettes blanches. De plus, les biais des peupliers faux-trembles et des pins gris sont assez fortement négatifs (-2.83 m et -1.05 m) alors celui des épinettes blanches est négatif mais assez près de zéro (-0.41 m).

Une première hypothèse pour expliquer ce phénomène serait que le type de feuilles et la morphologie des conifères laisserait davantage pénétrer les impulsions lidar. Ainsi, les chances d'obtenir un retour sur les branches les plus basses de la couronne seraient meilleures et les surestimations moins fréquentes pour ces espèces. Les cas de sous-estimation pourraient être dû à des branches vivantes assez importantes ne faisant pas partie de la couronne, à des branches mortes ou défoliées suffisamment grandes ou nombreuses (fréquent dans le cas des épinettes blanches observées sur le terrain à l'étude) ou encore à des arbres ou de la végétation sous couvert dont la cime serait assez rapprochée de la base de la couronne de l'individu mesuré. Il est également possible que dans certains cas, un lissage trop fort du profil de densité ait conduit à une sous-estimation de la mesure.

Dean *et al.* (2009) et Holmgren et Persson (2004) affirment que plus la hauteur de la base de la couronne est basse, plus la surestimation de la hauteur prédite avec le lidar est importante. Sans faire une analyse quantitative très poussée, les résultats de notre recherche ne semblent pas nous permettre de confirmer cette affirmation pour toutes les espèces. Si l'on considère les arbres de notre échantillon, l'épinette blanche est l'espèce pour laquelle les hauteurs de la base de la couronne sont les moins élevées. Or, cette espèce présente également le biais et l'écart type le plus faible (Tableau 5.4). Un examen rapide des Tableaux 5.1 et 5.3 nous permet également d'observer que pour les épinettes blanches et les pins gris, il ne semble pas y avoir de lien entre la hauteur de la base de la couronne et la surestimation. Les coefficients

de détermination respectifs de l'épinette blanche et du pin gris, pour ce lien, sont par ailleurs très faibles soit de 0.01 et 0.06. Si l'on observe seulement les peupliers (Tableau 5.2), cette tendance à avoir une surestimation plus grande lorsque la hauteur de la base de la couronne est basse semble toutefois se confirmer. Un coefficient de détermination de 0.50 nous confirme qu'un faible lien existe probablement entre la hauteur de la base de la couronne des individus et l'importance de la surestimation.

En plus des facteurs liés à la méthode de traitement utilisée, aux espèces mesurées et aux données lidar (densité de retours, retours intermédiaires) déjà mentionnés, l'environnement immédiat et le statut de l'arbre (taille relative de l'arbre par rapport à ses voisins) peuvent certainement avoir une influence sur la précision de la mesure de la hauteur de la base de la couronne. Dans le cadre de la présente recherche, certaines des placettes échantillonnées avaient une structure relativement complexe (peuplements mixtes et non équiens, abondance de végétation dans les strates inférieures de la canopée). Ainsi, il est possible que des arbres adjacents aux échantillons aient empêché des impulsions lidar d'atteindre les parties basses des couronnes, que d'autres arbres aient été présents sous le couvert ou que leurs branches se soient étendues sous la couronne des arbres mesurés. Cela dit, il faut également souligner que pour bien évaluer le potentiel des outils lidar à estimer la hauteur de la base de la couronne, la précision des mesures de référence acquises sur le terrain est cruciale.

Dans cet ordre d'idée, les écarts que nous avons observés entre les prédictions lidars et les valeurs de référence peuvent également s'expliquer par le fait que sur le terrain, la hauteur de la plus basse branche vivante a été mesurée, et non pas celle de la hauteur de la base de la couronne. Parfois, cette branche peut-être détachée de la couronne et, dans le cas d'arbres matures, la différence de hauteur peut être relativement importante. Des erreurs peuvent également avoir été commises lors de la mesure ou de la saisie des données. Notons que les deux arbres (un peuplier et un pin gris) que nous avons identifiés comme valeurs extrêmes, présentant un écart très fort entre les mesures lidars et terrains, pourraient vraisemblablement se trouver dans l'une de ces situations. C'est pourquoi nous avons choisi de ne pas les utiliser pour les analyses.

D'autre part, la hauteur mesurée sur le terrain est celle de la base de la branche, là où elle s'attache au fût de l'arbre. Il est possible que dans certains cas, cette branche ne soit pas parallèle au sol et que la hauteur réelle de la masse végétale, du feuillage composant la couronne, soit plus haute ou même légèrement plus basse que ce point d'attache. Malheureusement, nous ne disposons pas des informations nécessaires pour déterminer si des arbres faisant partie de notre échantillon sont dans l'une ou l'autre de ces situations.

Si l'on voulait répéter une expérience similaire, il serait préférable de mesurer non seulement la hauteur de la plus basse branche vivante, mais aussi la hauteur de la base de la couronne en faisant abstraction des branches qui s'en détachent. Il pourrait également être pertinent de tenter d'évaluer la hauteur de la base de la masse végétale composant la couronne, surtout dans le cas où cette hauteur semble différer significativement de celle du point d'attache de la plus basse branche qui la porte.

Dans cette recherche, des modèles linéaires ont été utilisés afin de pouvoir quantifier la force de la relation entre les hauteurs de la base de la couronne obtenues avec le lidar et les valeurs de référence mesurées sur le terrain. Il serait aussi envisageable d'utiliser la modélisation afin de prédire la hauteur réelle de la base de la couronne à partir de la mesure obtenue avec le lidar. En effet, selon ce qui peut être observé sur les différents graphes produits pour vérifier l'ajustement du modèle (Figure 5.10), et d'après les résultats obtenus avec les simulations de Monte Carlo (Figure 5.12 et Tableau 5.10), le modèle proposé semble assez bien s'ajuster aux résultats.

Pour notre second modèle, la seule variable prédictive ayant été utilisée est la mesure obtenue à partir des données lidar. Le choix de ne pas intégrer d'autres variables dans le modèle prédictif a été privilégié parce qu'une forte colinéarité peut être observée entre les différentes variables pouvant être extraites avec le lidar. De plus, puisque trois espèces distinctes constituaient l'échantillon à l'étude, proposer un lien entre, par exemple, la hauteur de l'arbre ou le diamètre de la couronne et la hauteur de la base de la couronne semblait peu pertinent. En ce qui concerne le type de modèle, à la lumière des résultats présentés, il semble qu'une relation linéaire soit appropriée.

Dans l'éventualité où l'option d'utiliser les modèles pour mieux prédire les valeurs réelles de la hauteur de la base de la couronne serait retenue, on recommanderait de tester d'autres modèles afin de déterminer lequel est le plus performant. Par exemple, des auteurs ayant utilisé la modélisation pour prédire différents attributs forestiers (notamment la hauteur) à partir de données lidar ont procédé à une transformation logarithmique des variables lidar et affirment ainsi obtenir de meilleurs résultats (Naesset et Økland, 2005; Naesset et Gobakken, 2005). Compte tenu de cette information, et du fait que la distribution de nos données est continue et positive, il serait intéressant de tester un modèle linéaire généralisé (GLM), adapté à une distribution gamma, avec un lien logarithmique et de comparer les résultats avec ceux obtenus avec le modèle linéaire.

Les résultats de notre recherche semblent cohérents avec ceux présentés dans d'autres études; on constate une tendance générale à sous-estimer la hauteur de la base de la couronne. Cela dit, une alternative à la modélisation pour améliorer la précision des estimations de la hauteur de la base de la couronne serait de procéder à une correction systématique des valeurs obtenues avec le lidar en les modifiant par la valeur du biais. Dans tous les cas, si l'on désire appliquer la méthode sur un territoire différent, il serait essentiel de procéder à un échantillonnage afin d'obtenir une mesure du biais représentative et de pouvoir calibrer correctement les mesures. De plus, afin de valider la performance de la modélisation ou de la correction systématique du biais, il serait nécessaire de tester la méthode choisie sur un échantillon indépendant.

Tel que décrit dans le chapitre Résultats, les graphiques présentant les profils de densité de hauteur et les nuages de points lidar (présentés à l'Annexe A) ont permis de constater que les profils de chacune des trois espèces présentent des caractéristiques spécifiques. En effet, la forme de la structure aérienne d'un arbre dépend de processus de croissance complexes et propres à l'espèce. Elle est tributaire de la façon dont s'effectue la croissance de l'arbre dans ses zones de croissance primaire (pousses sur la couronne et racines) et secondaire (expansion des branches et de la tige). Cela dit, les arbres d'une même espèce présentent habituellement une morphologie assez semblable, même si de nombreux facteurs exogènes (conditions écologiques, compétition, maladies, insectes, gravité, vent) peuvent influencer la

forme exacte de la couronne (Spurr et Barnes 1980; Strigul et al. 2008). La distribution de la masse foliaire, la forme des feuilles et leur répartition spatiale sont autant de facteurs particuliers à l'espèce pouvant influencer l'apparence des profils de densité de la distribution verticale des retours lidar.

Cela dit, la forme des profils de hauteur des points lidars pourrait vraisemblablement servir, seule ou en combinaison avec d'autres indicateurs lidar, à classifier des arbres par espèce. Par exemple, la proportion entre les retours classifiés végétation et les retours classifiés sol, la forme du nuage de points (conique, parabolique ou hémisphérique) et l'intensité des retours lidar pourraient être utilisées avec les profils pour tenter créer une signature propre aux espèces. Des efforts supplémentaires devraient cependant être déployés afin de déterminer les meilleures façons d'exploiter ces indicateurs et de mieux évaluer la contribution possible des profils.

Obtenir des profils de densité reflétant fidèlement la distribution des hauteurs lidars, et par conséquent la distribution verticale de la masse foliaire, est primordial non seulement si l'on espère les utiliser comme indicateurs pour une éventuelle classification, mais aussi pour obtenir une bonne estimation de la hauteur de la base de la couronne. Dans le chapitre traitant de la méthodologie, il est expliqué que les profils de densité verticale des retours ont été produits avec une méthode d'estimation de la densité non paramétrique par noyau. Lorsque l'on a recours à cette méthode, la force du lissage appliqué au profil de densité est contrôlée par la taille du noyau. Ce paramètre a donc une influence considérable sur la hauteur qui sera prédite grâce au profil de densité. Si le lissage est trop fort, des traits essentiels de la distribution verticale risquent d'être perdus. Inversement, s'il est trop faible, des détails non significatifs pourraient compromettre l'analyse. Avec la méthodologie proposée, la taille optimale pour le noyau a été déterminée avec la méthode de Sheather-Jones, et ce, séparément pour chaque ensemble de points lidar. Il serait intéressant d'expérimenter d'autres techniques permettant de déterminer automatiquement la taille optimale du noyau et de comparer les résultats obtenus avec chacune afin de vérifier si la méthode sélectionnée est celle produisant les meilleurs résultats.

Dans cette étude, nous avons concentré très spécifiquement nos travaux sur la mesure de la hauteur de la base de la couronne et c'est pourquoi nous avons choisi de délimiter manuellement les couronnes des arbres composant l'échantillon. Il faut considérer que lorsque l'on voudra utiliser la méthode proposée pour acquérir des mesures à l'échelle de peuplement ou de territoire, il sera nécessaire de la jumeler avec un algorithme permettant d'automatiser la délimitation des couronnes. Nous tenterons donc d'anticiper les effets que pourraient avoir les erreurs de délimitation des couronnes sur les résultats.

D'abord, la précision du tracé du contour des couronnes (segment) peut avoir un impact sur la qualité des mesures avec la méthode proposée. En effet, si le contour de la couronne est trop grand, des retours appartenant à des arbres voisins pourraient être inclus dans le nuage de points qui servira à tracer le profil de densité. Inversement, si le contour est trop serré, des points situés en périphérie pourraient être exclus. Dans un cas comme dans l'autre, plus la quantité de points mal segmentés sera grande, plus il risque d'y avoir un effet important sur la précision de la mesure. Ensuite, on devra aussi considérer les erreurs de dénombrement. Celles-ci peuvent être divisées en deux catégories soit les erreurs de commission et celles d'omission. Dans le premier cas, un ou des arbres sont en trop. Par exemple, la couronne d'un grand arbre peut être été scindée en plusieurs parties par l'algorithme. Dans le second cas, des individus sont manquants. Par exemple, plusieurs individus peuvent être regroupés en une seule couronne. Éviter, ou réduire, les erreurs de dénombrement est un enjeu important pour la délimitation des couronnes. Ce type d'erreur devrait avoir un impact plutôt modéré sur la précision des mesures obtenues avec la méthode proposée. Qualitativement, pour les segments erronés, les mesures reflèteront davantage la hauteur de la base de la partie supérieure de la canopée que la hauteur de la base de la couronne. Cependant, dans la plupart des cas, la mesure devrait demeurer aussi précise que pour les arbres bien délimités.

CONCLUSION

Malgré les améliorations apportées au régime forestier québécois au cours de la dernière décennie et la volonté que manifeste le gouvernement en ce qui concerne une gestion plus saine des forêts, le système de gestion gouvernemental demeure incomplet à plusieurs égards. Afin que le nouveau régime forestier, axé sur la protection des écosystèmes et adopté par l'Assemblée nationale en 2010 puisse être appliqué, d'énormes défis doivent encore être relevés. Par exemple, un programme de suivi de la biodiversité et de l'ensemble des composantes forestières essentielles à l'aménagement forestier durable reste à mettre en place (Bureau du forestier en chef, 2010).

En effet, pour réussir à maintenir l'intégrité des écosystèmes lors de l'exploitation des ressources naturelles et pour planifier plus efficacement l'activité forestière, il apparaît essentiel d'intégrer les connaissances concernant les relations écologiques du milieu et de développer des moyens plus performants pour le caractériser. Une connaissance précise de l'état actuel de nos forêts et une capacité à renouveler cette information est cruciale. De plus, afin de modéliser les interactions entre l'atmosphère et l'écosystème, de réaliser des études en écophysiologie ou d'étudier l'effet des changements climatiques sur la forêt, il est nécessaire de mesurer efficacement la canopée à différentes échelles. Baser l'acquisition des données sur l'élément structurant de la forêt, c'est-à-dire sur l'arbre, apparaît comme une solution efficace puisque d'une part, cela permet une étude très détaillée et d'autre part, il est possible de grouper les données si l'on désire étudier des peuplements ou des phénomènes plus globaux.

Les technologies d'acquisition de l'information ont rapidement progressé au cours des dernières décennies. Les méthodes de traitement de données et leur mise en application pour

la production de cartes ont également connu des avancées importantes. Il a été démontré que les données acquises avec des capteurs lidar à balayage et à petite empreinte peuvent être exploitées efficacement afin d'obtenir de l'information sur les arbres individuels. Elles présentent la qualité unique de permettre une étude de la canopée en trois dimensions avec une grande précision. Ainsi, tous les paramètres de la couronne (forme, la longueur, diamètre, aire couverte, volume et surface foliaire) peuvent être estimés directement ou indirectement à partir de l'étude de nuages de points produits d'une segmentation automatisée, un processus permettant d'isoler les arbres individuels.

.Dans ce contexte, l'objectif de la présente étude était d'estimer la hauteur de la base de la couronne vivante d'arbres individuels de la forêt québécoise à l'aide de données lidar obtenues grâce à un capteur permettant l'enregistrement de retours multiples. Pour ce faire, nous avons proposé une méthode permettant d'estimer la hauteur de la base de la couronne vivante en exploitant les données lidar. Cette méthode se distingue de celles proposée dans les études antérieures par la façon dont les données ont été traitées afin d'obtenir les courbes à partir desquelles nous dérivons la hauteur de la base de la couronne. D'abord, il a été proposé d'utiliser des profils de densité de probabilité plutôt que d'ajuster une courbe à des histogrammes ou des profils de fréquences. Ensuite, pour dresser les profils, une méthode d'estimation de la densité non paramétrique par noyaux à été utilisée. La performance de cette méthode à été évaluée dans une forêt mixte naturelle du sud de la zone boréale. Il a été démontré que dans ce contexte, une analyse du profil de la densité verticale des retours lidar pouvait être utilisée pour estimer assez précisément la hauteur de la base de la couronne.

Les résultats obtenus sont comparables à ceux publiés par d'autres chercheurs et ils viennent renforcer les conclusions émises par ceux-ci sur le sujet. Une tendance générale à surestimer la hauteur de la base de la couronne a été observée. Nous soulignons cependant que l'importance de cette surestimation semble varier en fonction des espèces mesurées. Il a également été suggéré que le biais négatif observé lorsque le lidar est utilisé pour la mesure de ce paramètre pourrait faire l'objet d'une correction systématique. Contrairement à ce qui a été avancé par d'autres auteurs, nous n'observons pas un lien entre l'importance de cette surestimation et la hauteur de la base de la couronne mesurée sur le terrain. En ce qui

concerne l'utilisation de données issues d'appareils lidar permettant l'enregistrement de retours multiples, il nous semble raisonnable d'affirmer que le fait de disposer d'une plus grande densité de retours à l'intérieur de la canopée aie influencé positivement l'exactitude de nos résultats. Il serait cependant nécessaire d'effectuer des traitements et analyses supplémentaires afin confirmer cette hypothèse. Enfin, nos résultats démontrent l'applicabilité des méthodes de mesure de la hauteur de la base de la couronne similaire à celle proposée dans la forêt boréale canadienne.

Le travail effectué a aussi permis de souligner le fait que de nombreuses variables, qu'elles soient associées au milieu étudié ou à l'acquisition des données, peuvent influencer la précision des mesures effectuées par lidar. Il a été suggéré que des recherches plus approfondies pourraient être menées afin de mieux comprendre leurs effets respectifs. D'une part, déterminer les paramètres idéaux pour l'acquisition de données aiderait à maximiser le rapport coût/superficie en fonction de la précision des mesures désirées. D'autre part, mieux comprendre l'effet des cibles sur les données lidar pourrait faciliter le développement d'algorithmes mieux adaptés au milieux étudiés et ouvrirait la porte à d'autres utilisations telles que l'identification de l'espèce.

Jumeler la méthode proposée à des algorithmes permettant de segmenter les données lidar par arbre individuel et d'estimer les autres paramètres de la couronne (hauteur, diamètre, forme) ouvrirait de nombreuses possibilités. D'abord, des cartes de hauteur de la base de la couronne assez précises pourraient être utiles pour évaluer les risques liés aux feux. Ensuite, le volume de la couronne de chaque arbre pourrait être évalué plus précisément. Par conséquent, il serait possible de prédire plus justement le volume de bois par l'utilisation d'équations allométriques. Ainsi, l'aménagement forestier pourrait être mieux éclairé.

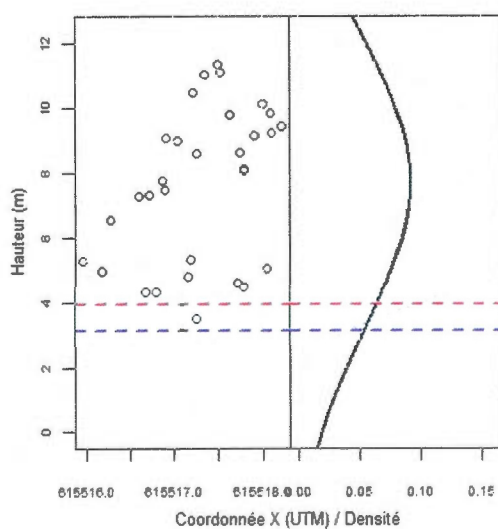
Pour terminer, nous insistons sur le fait que dans le futur, il sera nécessaire de maintenir, sinon de multiplier, les efforts pour mieux comprendre comment les outils de télédétection disponibles peuvent être exploités afin de décrire plus efficacement et plus précisément la forêt. Bien évaluer le potentiel de ces outils permettra d'optimiser leur utilisation et, éventuellement, de produire des cartes ou des jeux de données numériques plus complets qui

aideront à une meilleure évaluation de l'état du milieu forestier. Ainsi, il sera possible de mieux le comprendre et de mieux l'aménager.

ANNEXE A

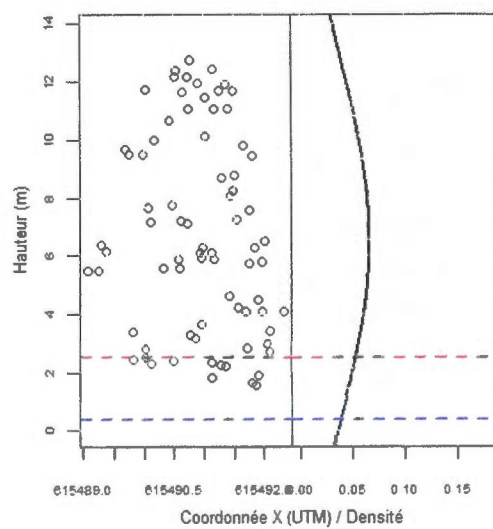
VISUALISATION DES RETOURS, DU PROFIL DE DENSITÉ, DE L'OBSERVATION TERRAIN ET DE LA MESURE LIDAR (PAR INDIVIDU)

Épinettes blanches (EPB)



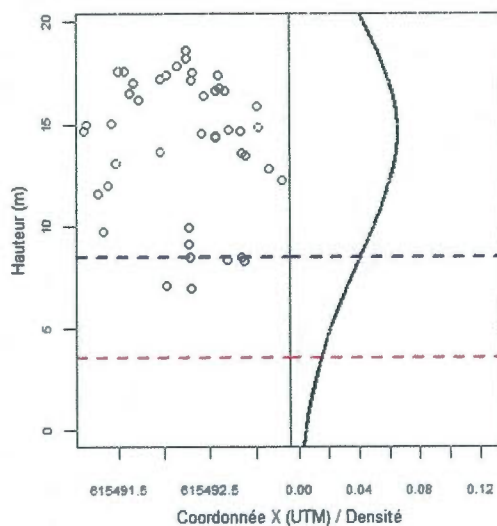
Individu 164 (EPB)

-- Terrain : 3.95 m
 -- Lidar : 3.13 m
 — Densité (plug-in SJ)
 Densité (LSCV)

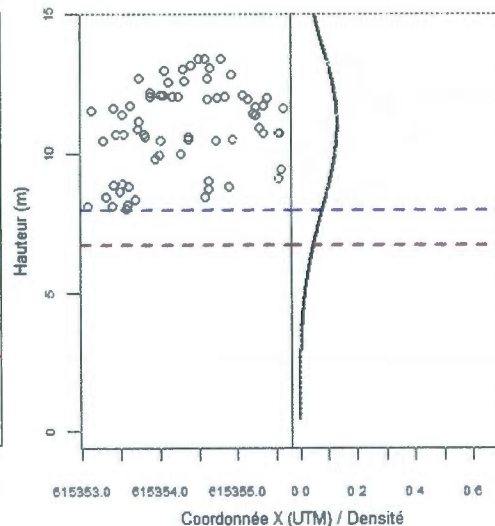


Individu 549 (EPB)

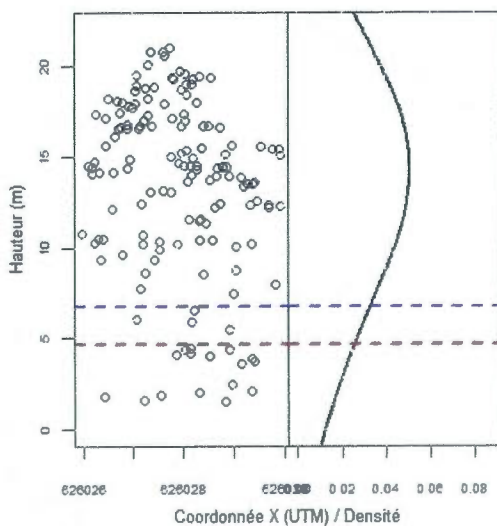
-- Terrain : 2.54 m
 -- Lidar : 0.36 m
 — Densité (plug-in SJ)
 Densité (LSCV)



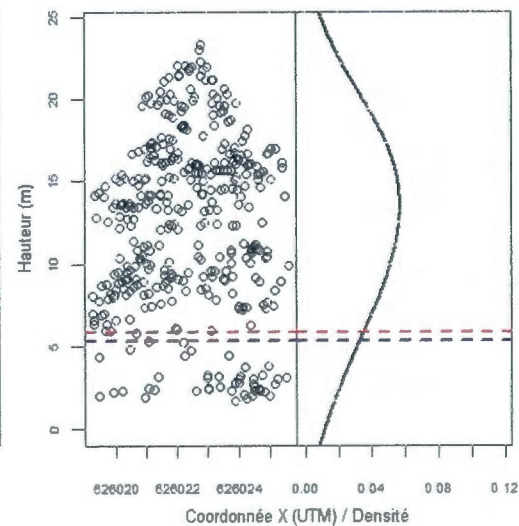
Individu 552 (EPB)
 - - Terrain : 3.6 m
 - - Lidar : 8.49 m
 — Densité (plug-in SJ)
 Densité (LSCV)



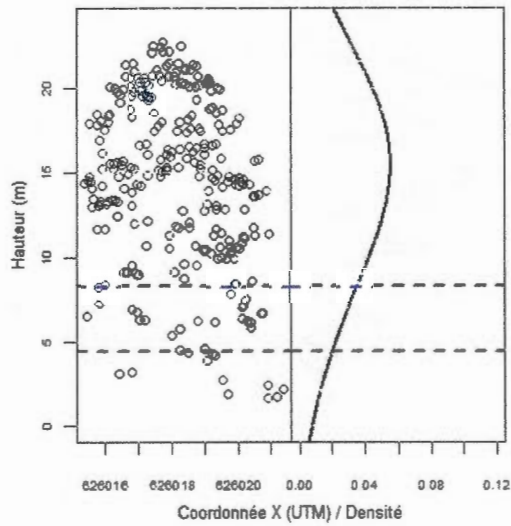
Individu 758 (EPB)
 - - Terrain : 6.74 m
 - - Lidar : 7.98 m
 — Densité (plug-in SJ)
 Densité (LSCV)



Individu 844 (EPB)
 - - Terrain : 4.69 m
 - - Lidar : 6.77 m
 — Densité (plug-in SJ)
 Densité (LSCV)

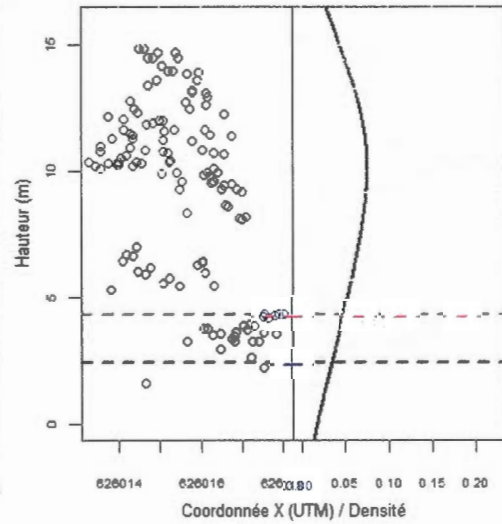


Individu 846 (EPB)
 - - Terrain : 5.85 m
 - - Lidar : 5.32 m
 — Densité (plug-in SJ)
 Densité (LSCV)



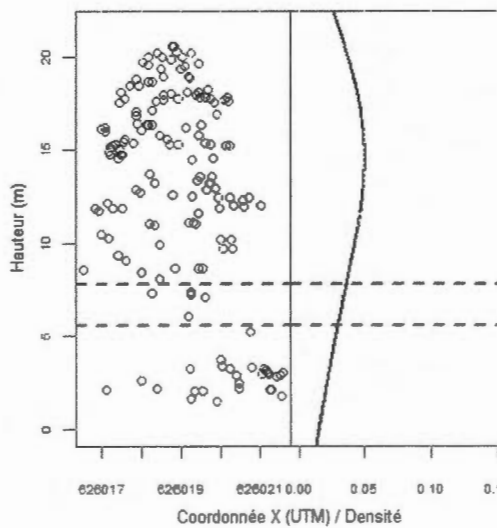
Individu 853 (EPB)

- Terrain : 4.44 m
- - Lidar : 8.25 m
- Densité (plug-in SJ)
- Densité (LSCV)



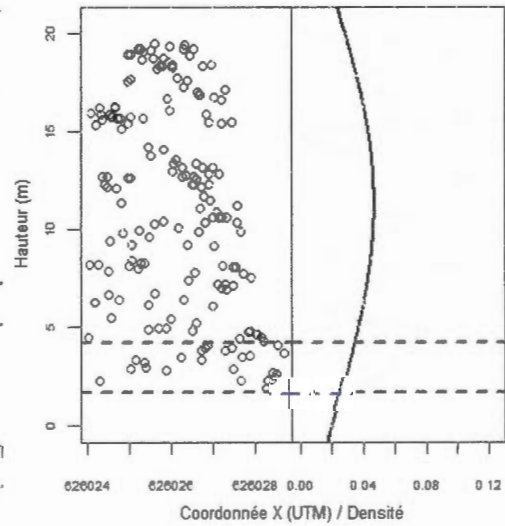
Individu 855 (EPB)

- Terrain : 4.35 m
- - Lidar : 2.44 m
- Densité (plug-in SJ)
- Densité (LSCV)



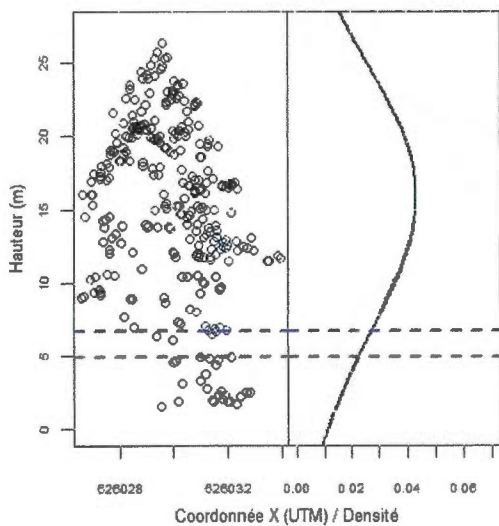
Individu 861 (EPB)

- Terrain : 5.53 m
- - Lidar : 7.78 m
- Densité (plug-in SJ)
- Densité (LSCV)

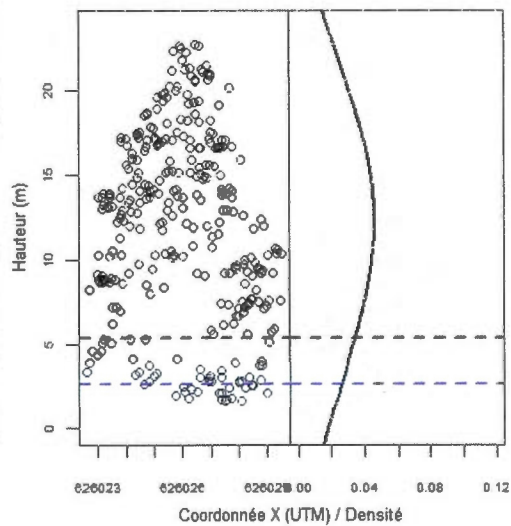


Individu 869 (EPB)

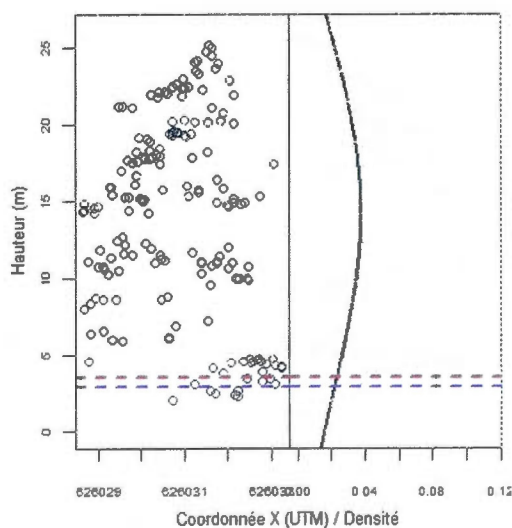
- Terrain : 4.2 m
- - Lidar : 1.67 m
- Densité (plug-in SJ)
- Densité (LSCV)



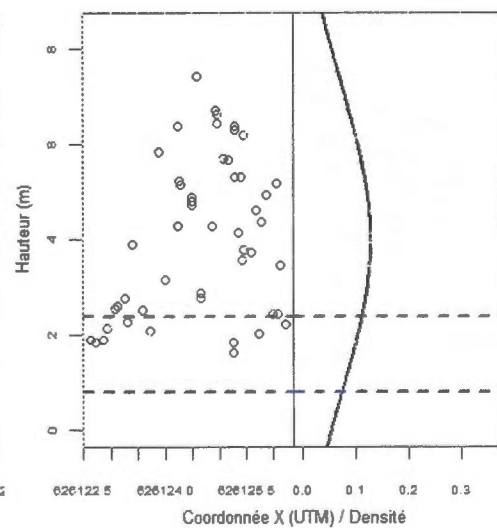
Individu 873 (EPB)
 - - Terrain : 4.93 m
 - - Lidar : 6.66 m
 — Densité (plug-in SJ)
 — Densité (LSCV)



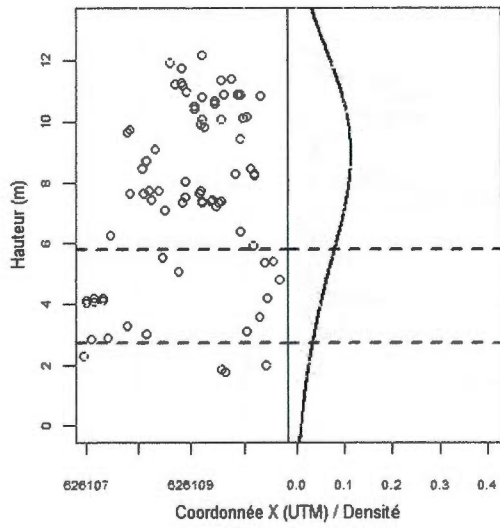
Individu 899 (EPB)
 - - Terrain : 5.33 m
 - - Lidar : 2.65 m
 — Densité (plug-in SJ)
 — Densité (LSCV)



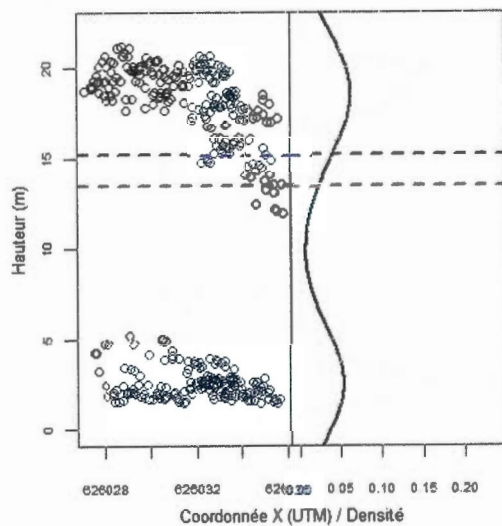
Individu 900 (EPB)
 - - Terrain : 3.52 m
 - - Lidar : 2.91 m
 — Densité (plug-in SJ)
 — Densité (LSCV)



Individu 920 (EPB)
 - - Terrain : 2.4 m
 - - Lidar : 0.8 m
 — Densité (plug-in SJ)
 — Densité (LSCV)

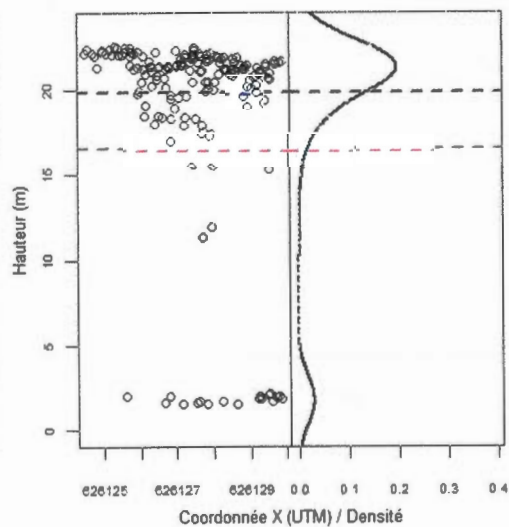


Peupliers faux-trembles (PET)



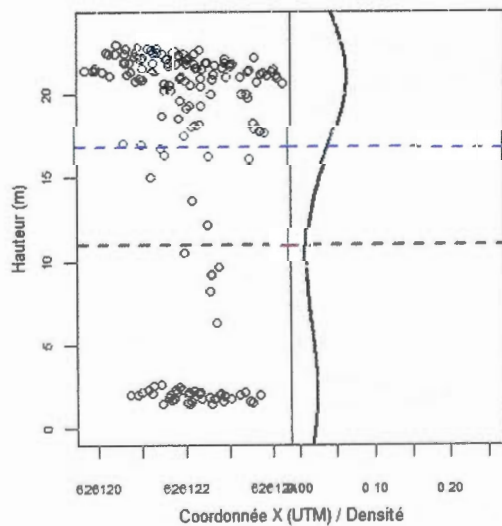
Individu 874 (PET)

-- Terrain : 13.5 m
 - - Lidar : 15.19 m
 — Densité (plug-in SJ)
 Densité (LSCV)



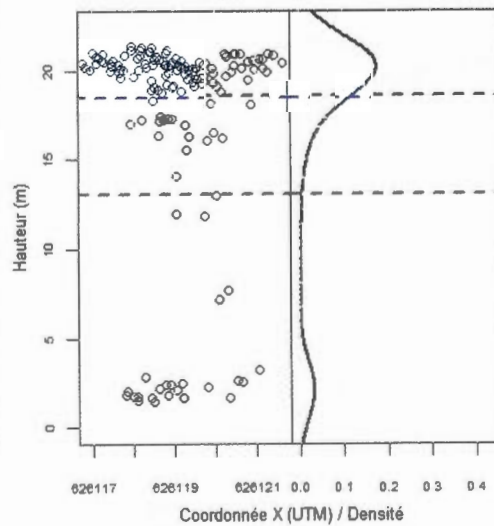
Individu 916 (PET)

-- Terrain : 16.5 m
 - - Lidar : 19.78 m
 — Densité (plug-in SJ)
 Densité (LSCV)



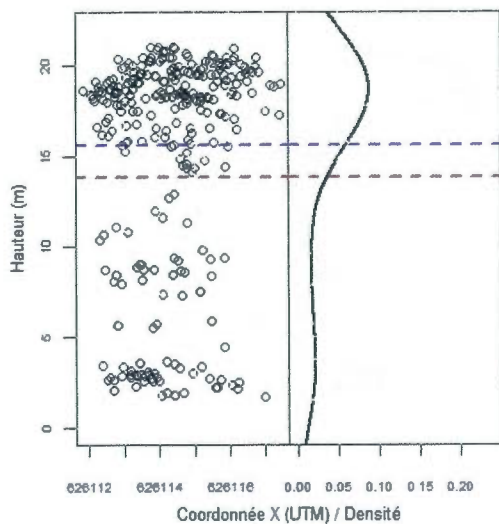
Individu 917 (PET)

-- Terrain : 11 m
 - - Lidar : 16.83 m
 — Densité (plug-in SJ)
 Densité (LSCV)

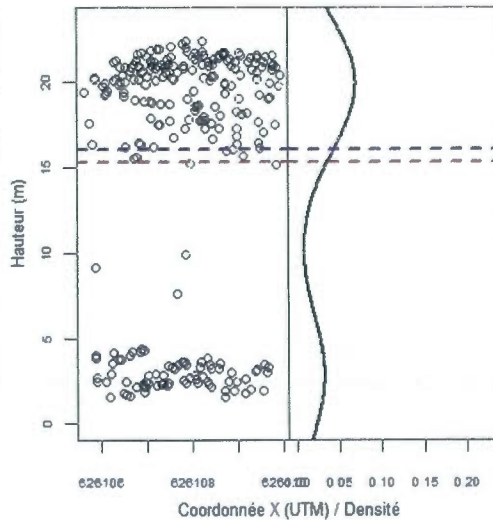


Individu 923 (PET)

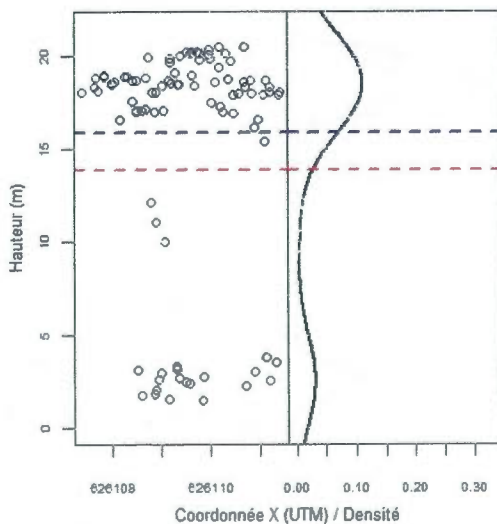
-- Terrain : 13.1 m
 - - Lidar : 18.6 m
 — Densité (plug-in SJ)
 Densité (LSCV)



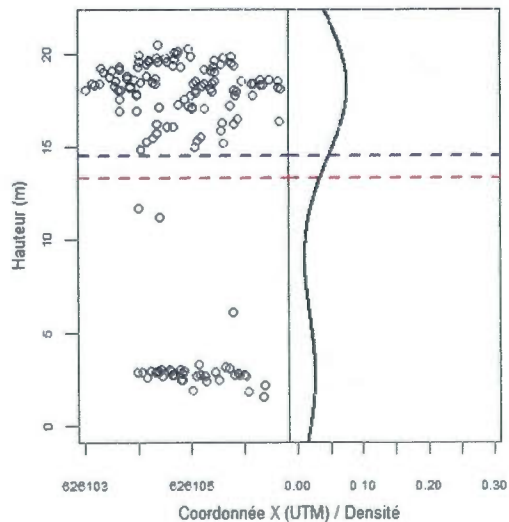
Individu 929 (PET)
 - - Terrain : 13.8 m
 - - Lidar : 15.58 m
 — Densité (plug-in SJ)
 — Densité (LSCV)



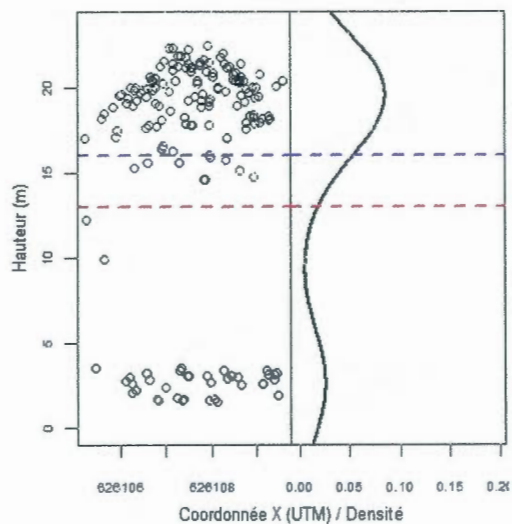
Individu 930 (PET)
 - - Terrain : 15.3 m
 - - Lidar : 16.03 m
 — Densité (plug-in SJ)
 — Densité (LSCV)



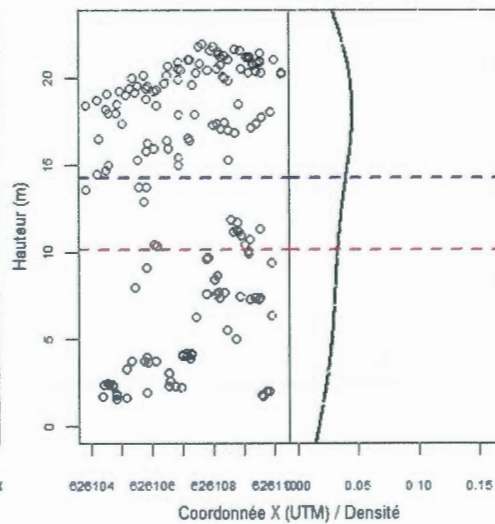
Individu 932 (PET)
 - - Terrain : 13.9 m
 - - Lidar : 15.88 m
 — Densité (plug-in SJ)
 — Densité (LSCV)



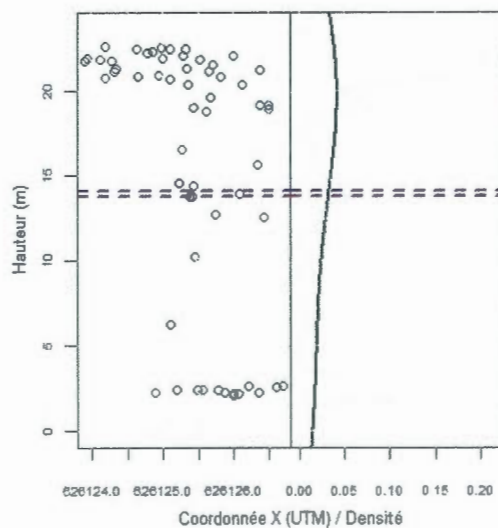
Individu 934 (PET)
 - - Terrain : 13.3 m
 - - Lidar : 14.51 m
 — Densité (plug-in SJ)
 — Densité (LSCV)



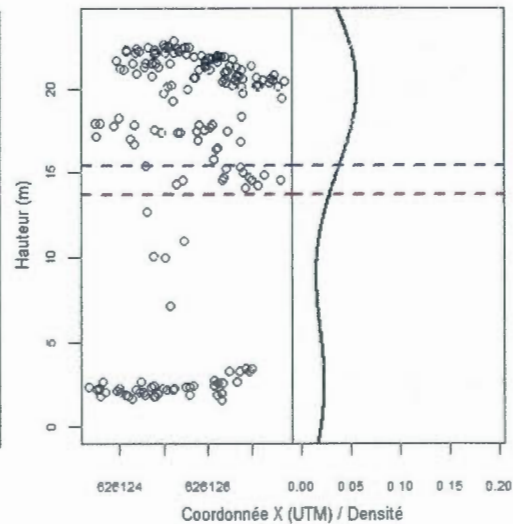
Individu 936 (PET)
 - - Terrain : 13 m
 - - Lidar : 16.08 m
 — Densité (plug-in SJ)
 — Densité (LSCV)



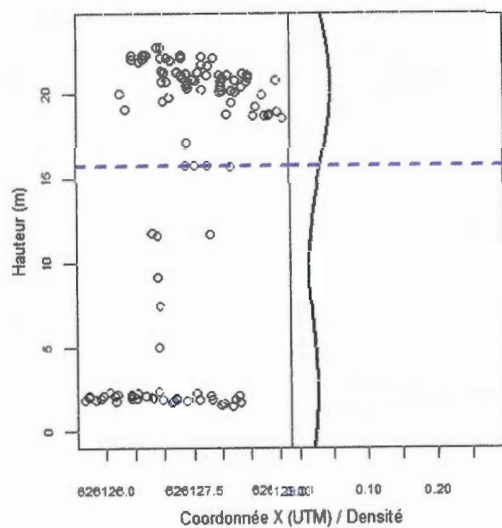
Individu 939 (PET)
 - - Terrain : 10.2 m
 - - Lidar : 14.29 m
 — Densité (plug-in SJ)
 — Densité (LSCV)



Individu 951 (PET)
 - - Terrain : 13.8 m
 - - Lidar : 14.05 m
 — Densité (plug-in SJ)
 — Densité (LSCV)

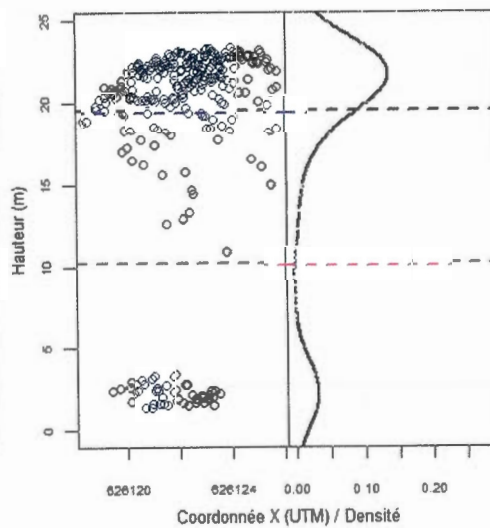


Individu 950 (PET)
 - - Terrain : 13.7 m
 - - Lidar : 15.41 m
 — Densité (plug-in SJ)
 — Densité (LSCV)



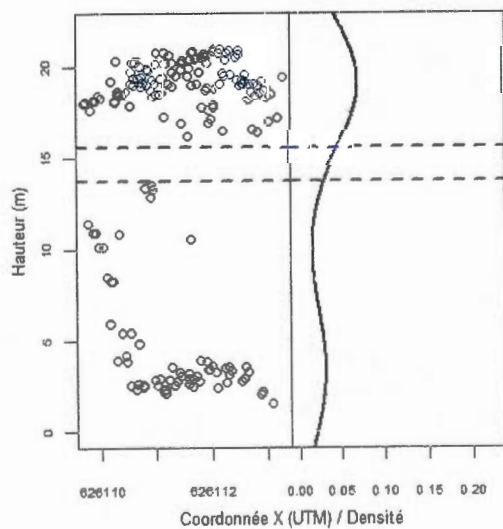
Individu 954 (PET)

- - Terrain : 15.7 m
- - Lidar : 15.76 m
- Densité (plug-in SJ)
- Densité (LSCV)



Individu 952 (PET)

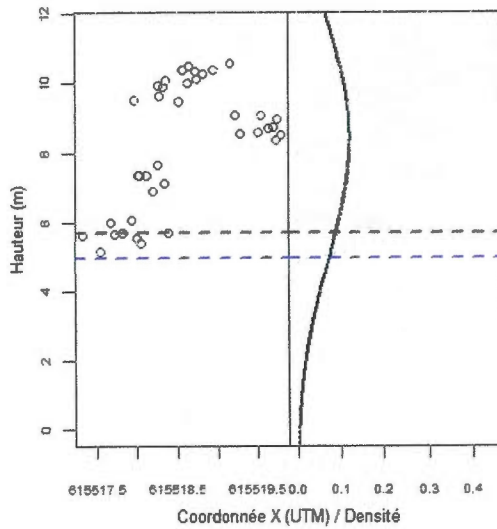
- - Terrain : 10.2 m
- - Lidar : 19.53 m
- Densité (plug-in SJ)
- Densité (LSCV)



Individu 968 (PET)

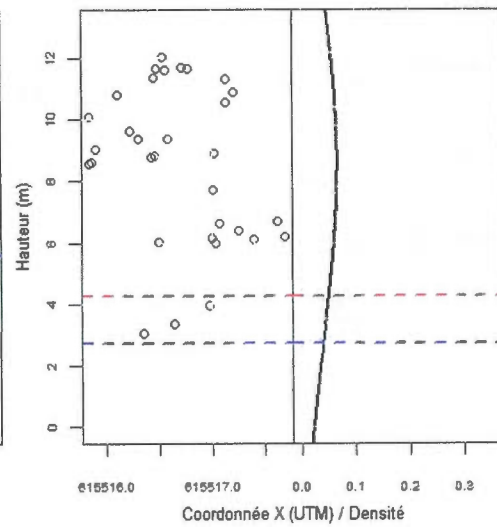
- - Terrain : 13.7 m
- - Lidar : 15.57 m
- Densité (plug-in SJ)
- Densité (LSCV)

Pins gris (PIG)



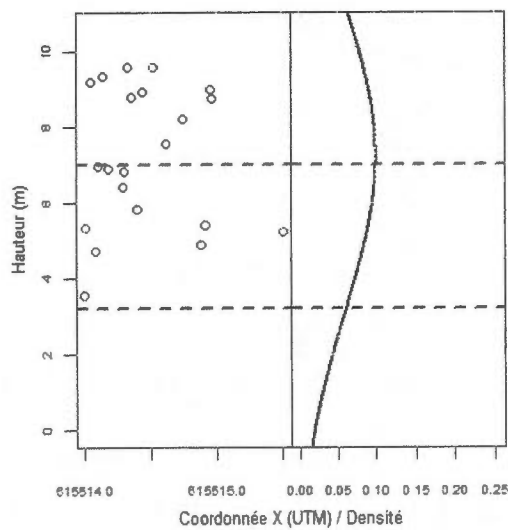
Individu 162 (PIG)

-- Terrain : 5.7 m
 - - Lidar : 4.98 m
 — Densité (plug-in SJ)
 Densité (LSCV)



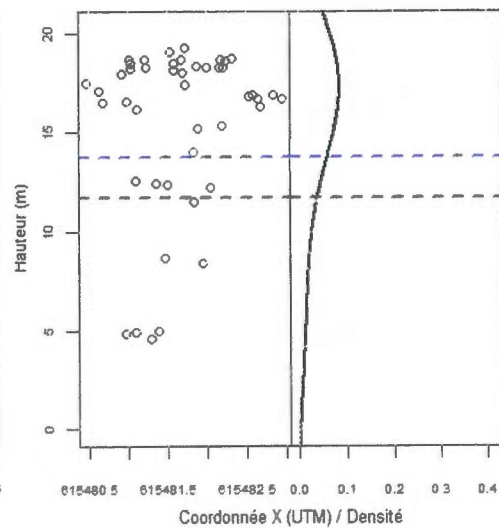
Individu 165 (PIG)

-- Terrain : 4.25 m
 - - Lidar : 2.72 m
 — Densité (plug-in SJ)
 Densité (LSCV)



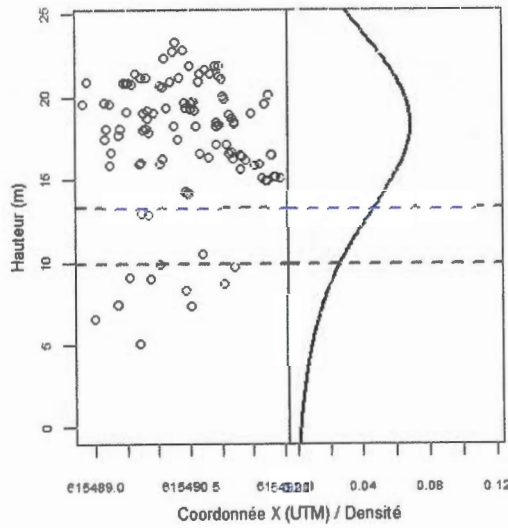
Individu 167 (PIG)

-- Terrain : 7 m
 - - Lidar : 3.21 m
 — Densité (plug-in SJ)
 Densité (LSCV)

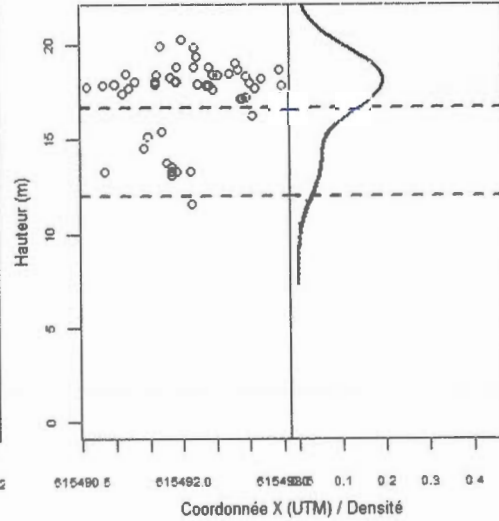


Individu 508 (PIG)

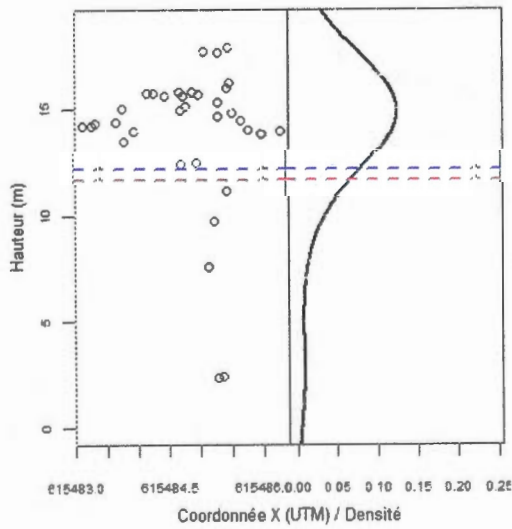
-- Terrain : 11.7 m
 - - Lidar : 13.76 m
 — Densité (plug-in SJ)
 Densité (LSCV)



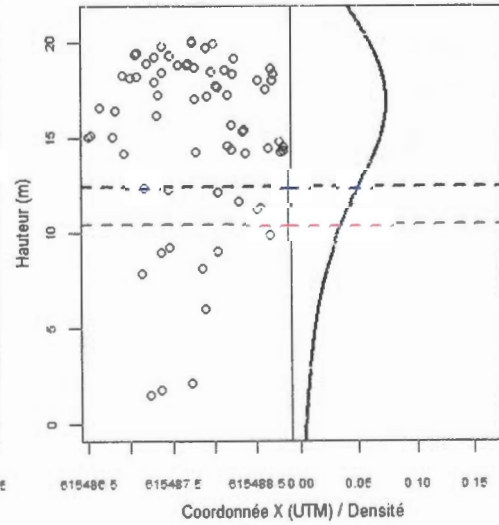
Individu 576 (PIG)
 - - Terrain : 9.9 m
 - - Lidar : 13.25 m
 — Densité (plug-in SJ)
 — Densité (LSCV)



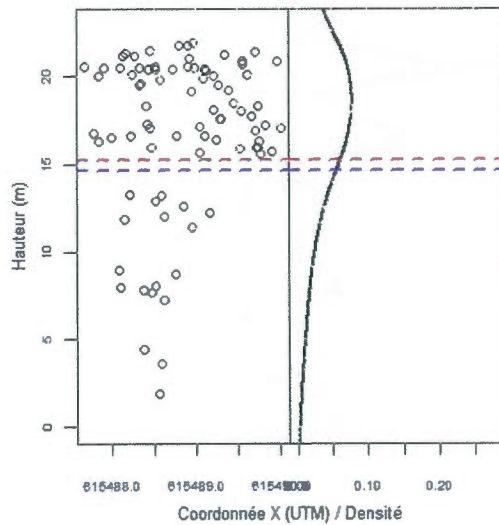
Individu 629 (PIG)
 - - Terrain : 12 m
 - - Lidar : 16.69 m
 — Densité (plug-in SJ)
 — Densité (LSCV)



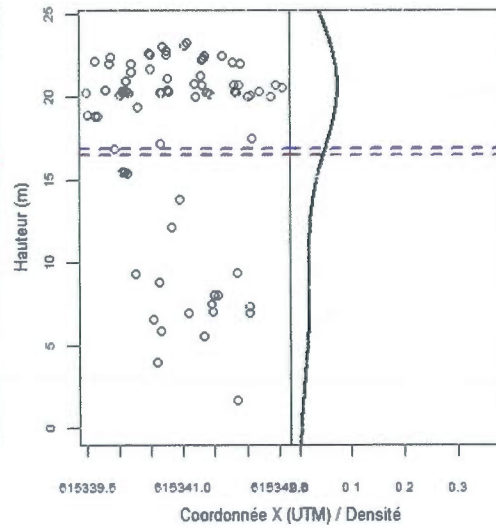
Individu 544 (PIG)
 - - Terrain : 11.7 m
 - - Lidar : 12.18 m
 — Densité (plug-in SJ)
 — Densité (LSCV)



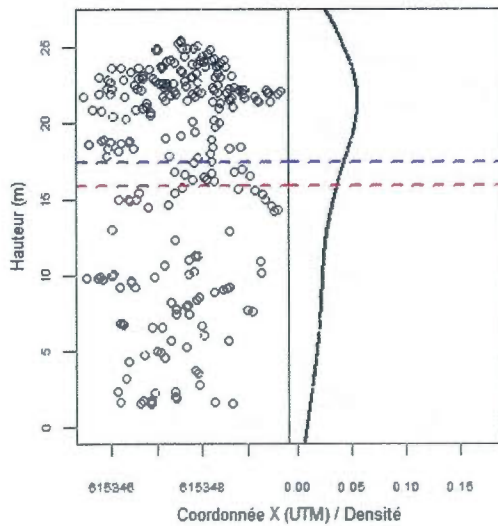
Individu 545 (PIG)
 - - Terrain : 10.4 m
 - - Lidar : 12.41 m
 — Densité (plug-in SJ)
 — Densité (LSCV)



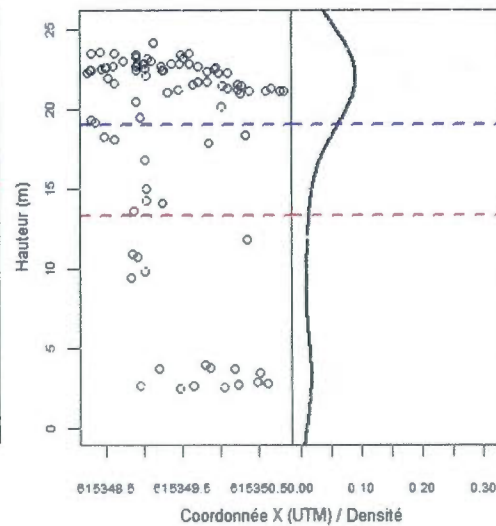
Individu 630 (PIG)
 - - Terrain : 15.2 m
 - - Lidar : 14.61 m
 — Densité (plug-in SJ)
 Densité (LSCV)



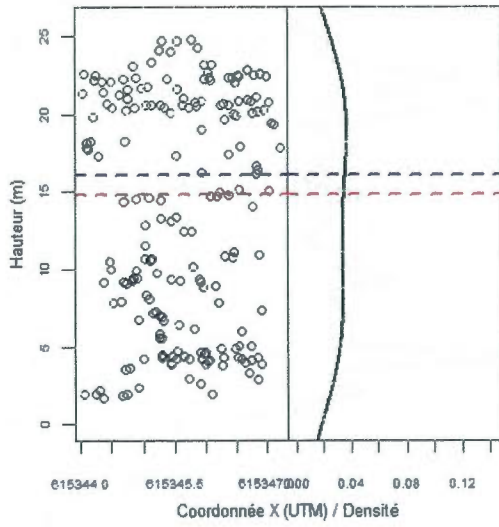
Individu 681 (PIG)
 - - Terrain : 16.5 m
 - - Lidar : 16.88 m
 — Densité (plug-in SJ)
 Densité (LSCV)



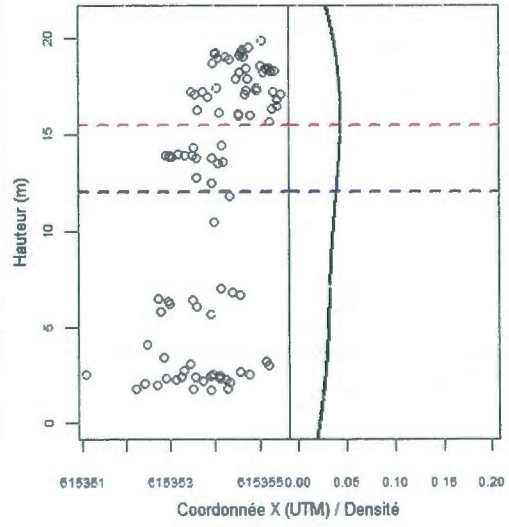
Individu 737 (PIG)
 - - Terrain : 15.8 m
 - - Lidar : 17.39 m
 — Densité (plug-in SJ)
 Densité (LSCV)



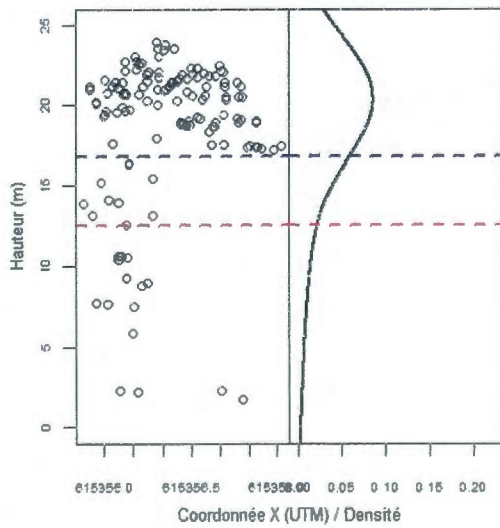
Individu 746 (PIG)
 - - Terrain : 13.3 m
 - - Lidar : 19.02 m
 — Densité (plug-in SJ)
 Densité (LSCV)



Individu 742 (PIG)
 - - Terrain : 14.8 m
 - - Lidar : 16.07 m
 — Densité (plug-in SJ)
 Densité (LSCV)



Individu 759 (PIG)
 - - Terrain : 15.5 m
 - - Lidar : 12.02 m
 — Densité (plug-in SJ)
 Densité (LSCV)



Individu 760 (PIG)
 - - Terrain : 12.5 m
 - - Lidar : 16.76 m
 — Densité (plug-in SJ)
 Densité (LSCV)

BIBLIOGRAPHIE

- Albaugh, Timothy J., H. Lee Allen, Phillip M. Dougherty, Lance W. Kress, et John S. King. 1998. « Leaf area and above- and belowground growth responses of loblolly pine to nutrient and water additions ». *Forest Science*, vol. 44, no 2.
- Andersen, Hans-Erik, Robert J. McGaughey et Stephen E. Reutebuch. 2005. « Estimating forest canopy fuel parameters using LIDAR data ». *Remote Sensing of Environment*, no 94, p. 445-449.
- Bérard, Jean A. et Marc Côté. 1996. *Manuel de foresterie*. Sainte-Foy (Qué.), Presses de l'Université Laval.
- Belsley, David A., Edwin Kuh et Roy E. Welsch. 1980. *Regression Diagnostics: Identifying Influential Data and Sources of Collinearity*. New York (USA), John Wiley & Sons.
- Bollen, Kenneth A. et Robert W. Jackman. 1990. « Regression diagnostics: An expository treatment of outliers and influential cases ». In *Modern Methods of Data Analysis*, sous la dir. de J. Fox et J. Scott Long, p. 257-291, Newbury Park (USA), Sage publications, inc.
- Boyd, D.S. et F.M. Danson. 2005. « Satellite Remote Sensing of Forest Resources: Three Decades of Research Development ». *Progress in physical geography*, no 29, p. 1-26.
- Brack, Cris. 2000. *Forest Measurement and Modelling*. En ligne <<http://sres-associated.anu.edu.au/mensuration/home.htm>>. Consulté le 12 avril 2007.
- Breuer, L. et H. Frede. 2003. *PlaPaDa - an online plant parameter data drill for eco-hydrological modelling approaches*. En ligne <<http://www.uni-giessen.de/~gh1461/plapada/plapada.html>>. Consulté le 15 novembre 2010.
- Canada, Ressources Naturelles Canada, Service Canadien des forêts. 2008. En ligne <<http://scf.rncan.gc.ca>>. Consulté le 15 octobre 2008.
- Chauve, Adrien, Clément Mallet, Frédéric Bretar, Sylvie Durrieu, Marc Pierrrot-Deseilligny, et William Puech. 2007. « Processing full-waveform Lidar data: modeling raw signals

» In *ISPRS workshop on laser scanning 2007 and Silvilaser 2007* (Espoo, 12-14 septembre 2007) Finlande.

- Chasmer, Laura. Chris Hopkinson et Paul Treitz. 2004. « Assessing the three-dimensional frequency distribution of airborne and ground-based Lidar data for red pine and mixed deciduous forest plots ». *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol 34, no 8, p. 66-70.
- Commission d'étude sur la gestion de la forêt publique québécoise. 2004. *Rapport, décembre 2004*. Bibliothèque nationale du Québec.
- Cook, R.Dennis et Sanford Weisber. 1982. *Residuals and influence in regression*. New York (USA), Chapman & Hall.
- Coops, Nicholas.C., Thomas Hilker, Michael A. Wulder, Benoît St-Onge, Glenn Newnham, Anders Siggins et J.A. Tony Trofymow. 2007. « Estimating canopy structure of Douglas-fir stands from discrete-return LiDAR ». *Trees Structure and Function*, no 21, p. 295-310.
- Dean, Thomas J., Quang V. Cao, Scott D. Roberts et David L. Evans. 2009. « Measuring heights to crown base and crown median with LiDAR in a mature even-aged loblolly pine stand ». *Forest Ecology and Management*, no 257, p. 126-133.
- Ducic, Vesna, Markus Hollaus, Andreas Ullrich, Wolfgang Wagner et Thomas Melzer. 2006. « 3D vegetation mapping and classification using full-waveform laser scanning » In *Workshop on 3d remote sensing in forestry* (Vienne, 14-15 février 2006).
- Duncan, Allen. 2008. *Direct georeferencing in support of full-waveform Lidar*. Technical Note, Centre of Geographic Sciences, Nova Scotia Community College.
- Estes, John.E. et Jeff Hemphill. 2005. « Some Important Dates in the Chronological History of Aerial Photography and Remote Sensing ». *Department of Geography, University of California, Santa Barbara*. En ligne <<http://www.geog.ucsb.edu>>. Consulté le 24 août 2011.
- Friess, Peter. 2007. « Requirements for generating a geometrically correct point cloud ». *ISPRS Summer School 2007*, Optech International.
- Hall, Ronald J. 2003. « The roles of aerial photographs in forestry remote sensing image analysis » In *Remote Sensing of Forest Environment, Concept and Case Studies*, sous la dir. de Michael A. Wulder et Steven E. Franklin, Norwell (USA), Kluwer academic publisher, p. 47-75.
- Heidenreich, Nils-Bastian, Anja Schindler et Stefan Sperlich. 2010. « *Bandwidth Selection Methods for Kernel Density Estimation - A Review of Performance* ». Social Science

- Research Network. En ligne <<http://ssrn.com/abstract=1726428>>. Consulté le 24 août 2011.
- Holmgren, Johan, Fredrik Johansson, Kenneth Olofsson, Håkan Olsson et Anders Glimskär. 2008. « Estimation of crown coverage using airborne laser scanning ». *Silvilaser 2008*, (Edimbourg, 17-19 septembre 2008).
- Holmgren, Johan et Åsa Persson. 2004. « Identifying Species of Individual Trees Using Airborne Laser Scanner ». *Remote Sensing of Environnement*, no 90, p. 415-423.
- Holmgren, Johan., Åsa Persson et Ulf Söderman. 2008. « Species identification of individual trees by combining high resolution LiDAR data with multi-spectral images ». *International Journal of Remote Sensing* vol 29, no 5, p. 1537-1552.
- Hyypä, Juha, Hannu Hyypä, Paula Litkey, Xiaowei Yu, Henrik Haggrén, Petri Rönholm, Ulla Pyysalo, Juho Pitkänen, et Matti Maltamo. 2004. « Algorithms and methods of airborne laser scanning for forest measurements ». *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. vol 36, no 8.p. 82-89.
- Jutzi, Boris et Uwe Stilla. 2006. « Characteristics of the measurement unit of a full-waveform laser system ». *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, no 182, p. 17-22.
- Jonckheere, Inge, Stefan Fleck, Kris Nackaerts, Bart Muys, Pol Coppin, Marie Weiss et Frédéric Baret. 2004. « Review of Methods for In Situ Leaf Area Index Determination, Part I. Theories, Sensors and Hemispherical Photography ». *Agricultural and Forest Meteorology*, no. 121, p. 19-35.
- Jupp, David L.B. et Jennifer L. Lovell. 2007. « Airborne and Ground-Based Lidar Systems for Forest Measurement: Background and Principles. ». *CSIRO Marine and Atmospheric Research Papers*, no. 017.
- Kato, Akira, Monika L. Moskal, Peter Schiess, Mark E. Swanson, Donna Calhoun et Werner Stuetzle. 2009. « Capturing tree crown formation through implicit surface reconstruction using airborne lidar data ». *Remote Sensing of Environment*, no 113, p. 1148-1162.
- Lambert, Marie-Claude, Chhun-Huor Ung et Frédéric Raulier. 2005. « Canadian national tree aboveground biomass equations ». *Revue Canadienne de Recherche Forestière*, vol. 35.
- Lee, Alex, Richard Lucas et Cris Brack. 2004. « Quantifying vertical forest stand structure using small footprint Lidar to assess potential stand dynamics ». *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 36, no 8, p. 213-217.

- Lefsky, Michael A., David Harding, Warren B. Cohen, Geoffrey Parker, G. et Herman H. Shugart. 1999. « Surface Lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of eastern Maryland, USA ». *Remote Sensing of Environment*, no 67, p. 83-98.
- Leeuwen, Martin Van et Maarten Nieuwenhuis. 2010. « Retrieval of forest structural parameters using LiDAR remote sensing ». *European Journal of Forest Research*, no 129, p. 749-770.
- Lim, Kevin, Paul Treitz, Michael Wulder, Benoît St-Onge et Martin Flood. 2003. « Lidar remote sensing of forest structure ». *Progress in Physical Geography*, no. 27, p.88-106.
- Litkey, Paula, Petri Rönholm, Juho Lumme et Xinlian Liang. 2007. « Waveform features for tree identification » In *IPRS workshop on laser scanning 2007 and Silvilaser 2007*, (Espoo, 12-14 septembre 2007), Finlande.
- Lovell, Jennifer L., David L.B. Jupp, Darius S. Culvenor, et Nicholas C. Coops. 2003 « Using airborne and ground-based ranging Lidar to measure canopy structure in Australian forests ». *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 29, no. 5, p. 607-622.
- Malek, Moh H., Dale E. Berger et Jared W. Coburn. 2007. « On the inappropriateness of stepwise regression analysis for model building and testing ». *European Journal of Applied Physiology*, no 101, p. 263-264.
- Maltamo, Matti, Ole Martin Bollandsås, Jari Vauhkonen, Jay Breidenbach, Terje Gobakken, et Erik Naesset. 2010. « Comparing different methods for prediction of mean crown height in Norway spruce stands using airborne laser scanner data ». *Forestry*, Vol 83, no 3, p. 257-268.
- Maltamo Matti, K. Mustonen, Juha Hyyppä, Juho Pitkänen et Xiaowei Yu. 2004. « The accuracy of estimating individual tree variables with airborne laser scanning in a boreal nature reserve ». *Revue Canadienne de Recherche Forestière*, no 34, p. 1791-1801.
- Morsdorf, Felix, Erich Meier, Britta Allgöwer, et Daniel Nuesch. 2003. « Clustering in airborne laser scanning raw data for segmentation of single trees ». *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol 34 no 3, p. 27- 33.
- Myers, Norman. 1996. « The World's Forests: Problems and Potentials ». *Environmental Conservation*, no 23, p. 156-168.
- Naesset, Erik et Terje Gobakken. 2005. « Estimating forest growth using canopy metrics derived from airborne laser scanner data ». *Remote Sensing of Environment*, no 96, p. 453-465.

- Naesset, Erik et Tonje Økland. 2002. « Estimating Tree Height and Tree Crown Properties Using Airborne Scanning Laser in a Boreal Nature Reserve ». *Remote Sensing of Environment*. no. 79, p. 105-115.
- Nordin, Linda. 2006. « Analysis of waveform data from airborne laser scanner systems ». Mémoire de maîtrise, Luleå, Luleå University of Technology, 40 p.
- Optech. 2007. « ALTM Waveform Digitizer, Operation and Processing Manual, ALTM 3100, 3100EA and Gemini ». *Optech Incorporated Airborne Survey Products*, Ontario, Canada.
- Optech incorporated. 2006. En ligne <<http://www.optech.ca/>>. Consulté le 10 avril 2007.
- Persson, Åsa., Ulf Söderman, Johanna Töpel, et Simon Ahlberg. 2005. « Visualisation and analysis of full-waveform airborne laser scanner data » In *ISPRS workshop "Laser scanning 2005"*, (Enschede, 12-14 septembre 2005), Pays-Bas.
- Persson, Åsa, Johan Holmgren et Ulf Söderman. 2002. « Detecting and measuring individual trees using airborne laser scanner. » *Photogrammetric engineering & Remote Sensing*, vol 68, no 9, p. 925-932.
- Popescu, Sorin C. et Kaiguang Zhao. 2008. « A voxel-based lidar method for estimating crown base height for deciduous and pine trees », *Remote Sensing of Environment*, no 112, p.767-781.
- Pyysalo, Ulla et Hannu Hyyppä. 2002. « Reconstructing Tree Crowns from Laser Scanner Data for Feature Extraction ». In *ISPRS Commission III, Symposium 2002* (Graz, 9-13 Septembre), Autriche.
- Québec, , ministère des Ressources Naturelles et de la Faune, Bureau du forestier en chef. 2010. *Bilan d'aménagement forestier durable au Québec 2000-2008*. Roberval (Qué.)
- Québec, ministère des Ressources Naturelles et de la Faune. 2010. *Gros plan sur les ressources naturelles*. En ligne <<http://www.mrnf.gouv.qc.ca/>>. Consulté le 15 novembre 2010.
- Québec, ministère des Ressources Naturelles et de la Faune. (2008)¹. *La forêt pour construire le Québec de demain*. Bibliothèque et Archives nationales du Québec.
- Québec, ministère des Ressources Naturelles et de la Faune, Direction du développement de l'industrie des produits forestiers, Ressources et industries forestières. 2008². *Des femmes, des hommes, des régions, nos ressources*. Portrait statistique, édition mai 2008.

- Québec, ministère des Ressources Naturelles et de la Faune, Direction des inventaires forestiers Forêt Québec. 2006. *Normes d'inventaire forestier, placettes-échantillons permanentes*. Version provisoire.
- Reitberger, Josef., Peter Krzystek et Uwe Stilla. 2008. « 3D segmentation and classification of single trees with full waveform LIDAR data ». In *Silvilaser 2008*, (Edimbourg, 17-19 septembre), Écosse.
- (2007) « Combined tree segmentation and stem detection using full waveform Lidar data » In *IPRS workshop on laser scanning 2007 and Silvilaser 2007*, (Espoo, 12-14 septembre), Finlande.
- Reitberger, Josef, Claudius Schnörr, Peter Krzystek, P. et Uwe Stilla. 2009. « 3D segmentation of singles trees exploiting full waveform LIDAR data ». *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol 64, no 6, p. 561-574.
- Riaño David., Erich Meier, Britta Allgöwer, Emilio Chuvieco, et Susan L. Ustin. 2003. « Modeling Airborne Laser Scanning Data for the Spatial Generation of Critical Forest Parameters in Fire Behavior Modeling ». *Remote Sensing of Environment*. no. 86, p. 177- 186.
- Riaño, David, Emilio Chuvieco, Sonia Condis, Javier González-Matesanz et Susan L. Ustin. 2004. « Generation of crown bulk density for *Pinus sylverstris* L. from LIDAR ». *Remote Sensing of Environment*, no 92, p. 345-352.
- Roberts, Wesley J., Solomon Tesfamichael, Michael Gebreslasie, Jan Van Aardt et Fethi. B. Ahmed. 2007. « Forest structural assessment using remote sensing Technologies: an overview of the current state of the art ». *Southern Hemisphere Forestry Journal*, vol 69, no 3, p. 183-203.
- Rombouts, Jan. 2006. *Application of airborne Lidar in forestry in North America and Scandinavia*. Gottstein fellowship report, 45 pages.
- Ross, Jukhan. 1981. *The radiation regime and architecture of plant stands*. Den Haag, Pays-Bas, Dr W. Junk Publishers.
- Sheather, Simon J. et M Chris Jones. 1991. « A reliable data-based bandwidth selection method for kernel density estimation ». *Journal of the Royal Statistical Society*, vol B 53, p. 683-690.
- Sheather, Simon J. 2004. « Density Estimation ». *Statistical Science*, vol. 19, no 4, p. 588-597
- Solberg, Svein, Erik Naesset et Ole Martin Bollandsas. 2006. « Single tree segmentation using airborne laser scanner data in a structurally heterogeneous spruce forest ». *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol.72, no.12, p. 1369 à 1378.

- Spurr, Stephen Hopkin et Burton V. Barnes. 1980. *Forest Ecology*. 3^e éd., Malabar, Florida, Krieger publishing company, 687 p.
- St-Onge, Benoît. 2007. « La télédétection Lidar : théorie, application et mise en œuvre ». *Atelier de formation continue de l'Association Québécoise de Télédétection*, département de géographie, Université du Québec à Montréal. (Montréal, 27 avril).
- 2004. « L'altimétrie laser à balayage ». *Revue internationale de Géomatique*, no 14, p. 531- 558.
- St-Onge, Benoît, Paul Treitz et Michael A. Wulder. 2003. « Tree and canopy height estimation with scanning Lidar », » In *Remote Sensing of Forest Environment, Concept and Case Studies*, sous la dir. de Michael A. Wulder et Steven E. Franklin, Norwell (USA), Kluwer academic publisher, p. 489-509.
- Strigul, Nikolay, Denis Pristinsky, Drew W Purves, Jonathan Dushoff et Stephen W. Pacala. 2008 « Scaling from trees to forests: tractable macroscopic equations for forest dynamics ». *Ecological Monographs*, vol 78, no 4, p. 523-545.
- Todd, Kenton W., Ferenc Csillag et Peter M. Atkinson. 2003 « Three-Dimensional mapping of light transmittance and foliage distribution using Lidar ». *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 29, no. 5, p. 544-555.
- Vauhkonen, Jari. 2010 « Estimating crown base height for Scots pine by means of the 3D geometry of airborne laser scanning data ». *International Journal of Remote Sensing*, vol 30, no 5, p. 1213-1226.
- Wagner, Wolfgang., Andreas Ullrich, Vesna Ducic, Thomas Melzer et Nick Studnicka. 2006. « Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitizing airborne laser scanner », *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, no 60, p. 100-112.
- Wang, Yunsheng, Weinacker, Holger, Koch, Barbara. 2008 « A Lidar Point Cloud Based Procedure for Vertical Canopy Structure Analysis And 3D Single Tree Modelling in Forest ». *Sensor*, no. 8, p. 3938-3951.
- Weiss, Marie, Frédéric Baret., G. J. Smith, Inge Jonkheere, Pol Coppin. 2004 « Review of methods for in situ leaf area index determination, Part II. Estimation of LAI, errors and sampling », *Agricultural and Forest Meteorology*, no 121, p. 37- 53.
- Wulder, Michael. A. et Steven E. Franklin. 2003. *Remote Sensing of Forest Environment, concept and case studies*. Norwell (USA), Kluwer academic publishers.
- Véga, Cédric. 2006. « Cartographie des changements de hauteur du couvert forestier, de l'âge et de l'indice de qualité de station par altimétrie laser et photogrammétrie ». Thèse de doctorat, Montréal, Université du Québec à Montréal.

Zagalikis, G., Andrew D. Cameron, David R. Miller. 2005. « The application of digital photogrammetry and image analysis techniques to derive tree and stand characteristics ». *Revue Canadienne de Recherche Forestière*, no 35, p. 1224-1237.