

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

CARTOGRAPHIE DU VOLUME LIGNEUX
DES PEUPELEMENTS DE LA FORÊT BORÉALE
À L'AIDE DE DONNÉES D'ALTIMÉTRIE LASER

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GÉOGRAPHIE

PAR
ALAIN RENAUD

SEPTEMBRE 2000

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier Alain Leduc (au Groupe de recherche en écologie forestière interuniversitaire [GREF-I]), Patrick Dupuis, Christian Lavoie, Samuel Alloun, Marie-Ève Ferland et Benoît Poulin, du département de Géographie de l'Université du Québec à Montréal (UQAM), pour leur aide précieuse. Merci également aux membres du jury pour leurs commentaires lors du dépôt. Les travaux ont été financés par une bourse tirée d'une subvention CRSNG du directeur de recherche (Benoît St-Onge), qu'on remercie également, et une bourse personnelle de l'UQAM. Ce mémoire est dédié à Lizbet Navarro Picado, géographe (*para la geografía y todo lo demás*).

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	v
LISTE DES TABLEAUX	vii
RÉSUMÉ	viii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I	
LA MESURE DU VOLUME LIGNEUX	3
1.1 Le volume ligneux	3
1.2 L'évaluation du volume par télédétection	8
1.3 L'exploitation des résultats dendrométriques obtenus par SIG et télédétection	11
CHAPITRE II	
L'ALTIMÉTRIE LASER	13
2.1 Le LIDAR	13
2.2 Les applications du LIDAR en foresterie	17
2.3 Une synthèse de l'état de la question	24
CHAPITRE III	
LA RÉGION D'ÉTUDE ET LES RESSOURCES UTILISÉES	29
3.1 La région d'étude	29
3.2 Les données de terrain et cartographiques	31
3.3 Les données d'altimétrie laser	33

CHAPITRE IV	
LA MÉTHODOLOGIE	37
4.1 Choix des méthodes en fonction des résultats attendus	37
4.2 Les étapes de traitement	39
CHAPITRE V	
LES RÉSULTATS	50
5.1 Inventaire sur le terrain	50
5.2 Observations initiales sur les points laser au sol	56
5.3 Observations sur les points de végétation	58
5.4 Comparaison entre les résultats de terrain et du LIDAR	62
5.5 Analyse de la volumétrie dans les placettes	66
5.6 Extension spatiale à la région d'étude	78
CHAPITRE VI	
DISCUSSION	86
6.1 Bilan des résultats	86
6.2 Les expériences comparables	90
6.3 Les limites	91
6.4 Les applications	92
CONCLUSION	95
APPENDICE A	
PROTOCOLE DE TERRAIN – ÉTÉ 1999 – FERLD – GEIGER	97
APPENDICE B	
EXEMPLES DE REPRÉSENTATION D'INFORMATION PAR DES VUES EN 2D½	104
APPENDICE C	
TABLES, GRAPHIQUES ET CARTES DES RÉSULTATS	106
NOTES	120
GLOSSAIRE	121
RÉFÉRENCES	122
BIBLIOGRAPHIE SÉLECTIVE COMPLÉMENTAIRE	132

LISTE DES FIGURES

Figure		Page
2.1	Schéma d'un LIDAR type	13
2.2	Fonctionnement d'un système LIDAR	15
2.3	Principaux tests de LIDAR dans le monde	18
2.4	Exemple d'altimétrie en forêt avec un profilomètre	20
3.1	Localisation du lac Duparquet, Abitibi, Québec	29
3.2	Image TM de la zone forestière étudiée autour du lac Duparquet	31
3.3	Carte de la région d'étude à la zone de conservation de la FERLD, lac Duparquet, QC	32
3.4	Régions écologiques aux environs du lac Duparquet	33
3.5	Localisation de 38 placettes-échantillons sur une orthophoto du lac Duparquet, QC	36
4.1	Photo du LIDAR Optech	39
5.1	Hauteur totale de l'épinette blanche en fonction de son DHP	51
5.2	Hauteur totale du peuplier faux-tremble en fonction de son DHP	52
5.3	Diamètre de couronne de l'épinette blanche en fonction de son DHP	53
5.4	Diamètre de couronne du peuplier faux-tremble en fonction de son DHP	53
5.5	Comparaison du volume marchand brut calculé selon deux méthodes	56
5.6	Échantillon du signal laser montrant l'altitude de végétation et de sol au même point	58
5.7	Profil topographique dans un secteur en pente de la région d'étude	59
5.8	Modèle numérique de surface du couvert végétal pour une placette élargie	60

5.9	Histogramme de fréquence de mesures individuelles du DHP sur le terrain	63
5.10	Histogramme de fréquence de mesures individuelles de végétation par le LIDAR	64
5.11	Histogramme de fréquence de calculs individuels de volumétrie	65
5.12	Vues de 12 simili-placettes choisies sur une orthophoto du lac Duparquet, QC	74
5.13	Classe de volume marchand brut en fonction de la classe de contenance laser interpolée	75
5.14	Classe de couvert cartographique en fonction du couvert laser	77
5.15	Volume marchand brut en fonction de la contenance laser interpolée et du couvert	78
5.16	Exemple de stratification forestière de la région d'étude, lac Duparquet, QC	81
5.17	Carte du volume de terrain par strate de la région d'étude, lac Duparquet, QC	82
5.18	Carte du volume laser par strate de la région d'étude, lac Duparquet, QC	84
5.19	Carte du volume laser interpolé (20m x 20m) de la région d'étude, lac Duparquet, QC	85
6.1	Vue en 2D d'un modèle numérique du volume ligneux au lac Duparquet	94

LISTE DES TABLEAUX

Tableau		Page
3.1	Principales expériences d'altimétrie laser pour la mesure de paramètres forestiers	34
5.1	Sommaire des volumes de terrain pour 38 placettes du lac Duparquet, QC	55
5.2	Sommaire des contenances laser pour 38 placettes du lac Duparquet, QC	61
5.3	Résultats statistiques pour les variables de terrain et laser du lac Duparquet, QC	67
5.4	Nombre de placettes par classe de volume	73
5.5	Matrice de confusion des types de peuplement	76

RÉSUMÉ

La forêt couvre 40 % des superficies terrestres, et le Canada en possède 10 % à lui seul, en majorité en milieu boréal. Le besoin de planification et de gestion que cette réalité entraîne n'a pu jusqu'ici qu'être imparfaitement rempli par les méthodes traditionnelles d'inventaire forestier. On observe cette situation en particulier dans le domaine du volume ligneux, qui est une mesure essentielle tant pour les ingénieurs forestiers de l'industrie que pour les chercheurs en écologie. La technologie de l'altimétrie laser, en développement depuis plusieurs années, semble prometteuse à cet égard. Elle est fondée sur des propriétés géométriques, soit la rétrodiffusion d'un rayon laser par tout objet intercepté. La mesure du temps écoulé entre l'émission et la réception donne la distance entre l'appareil et l'objet et, par calcul, l'altitude des surfaces. La combinaison d'un signal laser par balayage et à haute résolution, d'une intensité d'échantillonnage augmentée, d'un positionnement exact par INS-GPS et d'un modèle volumétrique approprié devrait permettre de résoudre les dernières difficultés liées à cette technologie.

L'application de la méthode expérimentale a porté plus particulièrement sur des peuplements de deux espèces d'arbres, un feuillu, le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides Michx.*), et un conifère, l'épinette blanche (*Picea glauca [Moench] Voss*), qu'on retrouve dans la zone de conservation de la Forêt d'Enseignement et de Recherche du Lac Duparquet (FERLD), en Abitibi, au Québec. C'est ainsi que des mesures de volume dérivées d'un inventaire de terrain (38 placettes de 400 m²) fait à l'été 1999 sont comparées à des calculs de contenance obtenue à l'aide d'un LIDAR aéroporté (Optech ALTM1020), suite à trois survols effectués à l'été 1998 (400 000 points de sol et, deux millions de points de végétation). Bien que plusieurs des relations à une variable explicative utilisées soient significatives (r^2 de 0,52 à 0,77), les tests statistiques, reliant de façon quadratique chacune des huit conteneurs laser calculées au volume marchand brut de terrain, ont révélé une adéquation plus grande de l'interpolation laser seuillée à la moyenne de hauteur. En combinant celle-ci avec le taux de recouvrement, on obtient de meilleurs résultats ($r^2 = 0,8$), en particulier pour le peuplier ($r^2 = 0,88$ et fiabilité à 50 m³/ha près), sans doute à cause de sa couronne plus elliptique. Une prise en compte des faibles volumes sur le terrain (moins de 200 m³/ha) aurait sans doute permis d'améliorer ces résultats. À l'aide d'une stratification écologique par densité, hauteur et groupe d'essences, une cartographie probante de la région d'étude a pu être complétée (modèles numériques de terrain et de végétation).

Mots clés :

Abitibi, altimétrie, boréal, Duparquet, FERLD, forêt, hauteur, laser, LIDAR, Québec, volume

INTRODUCTION

Afin de réussir un aménagement plus durable de nos forêts, les gouvernements ont récemment proposé d'utiliser des indicateurs, en utilisant parfois la télédétection, entre autres pour la surveillance de la biomasse et de son accroissement annuel (Conseil canadien des ministres des forêts, 1997). Par ailleurs, les ingénieurs forestiers commencent à envisager une gestion plus écologique des milieux boisés (Bergeron *et al.*, 1999), par rapport à une vision traditionnelle plus mécaniste (Abeels, 1995). De plus, les clients intermédiaires ou finaux des produits forestiers exigent de plus en plus que ceux-ci soient certifiés (Upton et Bass, 1996).

Pour toutes ces raisons et d'autres, une utilisation plus efficace des ressources forestières est désirable et de là, une connaissance plus détaillée et à jour des couverts forestiers, dont le volume disponible est un des indicateurs les plus importants, sera nécessaire. Ces mesures forment la base pour évaluer la biomasse, puis la croissance et enfin, la productivité, dont la connaissance est nécessaire pour obtenir une foresterie responsable. D'ailleurs, on admet de plus en plus que, dans l'avenir immédiat, notre planète, la Terre, devra être gérée selon le principe du développement durable, notamment dans le secteur forestier.

La mesure des volumes forestiers est actuellement une opération longue et sujette à l'erreur, ce qui constitue un obstacle pour les chercheurs, les gouvernements et les industriels, sur les plans scientifique, politique ou économique. Le volume ligneux est essentiellement une mesure quantitative du nombre de mètres cubes de bois disponible en un endroit donné pour utilisation énergétique ou industrielle ultérieure, une fois récolté. Actuellement, le volume marchand est calculé de manière indirecte par différentes équations géométriques basées sur des mesures pratiques et disponibles, tels divers diamètres de tige ou hauteurs d'arbre. Procéder autrement signifierait probablement abattre les arbres au moment de la mesure car les instruments existants ne permettent pas d'obtenir directement et précisément le volume ou encore la masse d'un arbre sur pied dans une forêt (Young et Gliese, 1990). Comme on ne peut matériellement mesurer chaque arbre sur le terrain, toute autre technique employée constitue un compromis entre la

précision spatiale désirée (en terme de volumétrie et de localisation) et l'extension géographique à couvrir, le temps et les coûts associés, influençant aussi le choix d'une technique en particulier. Sacrifier à la précision spatiale entraîne aussi des conséquences, par exemple dans la planification des travaux au niveau des chemins forestiers, dont la rentabilisation est de plus en plus critique pour l'industrie. Des erreurs créent aussi des surprises dans le rendement effectif des peuplements coupés, par rapport aux prévisions.

Ces constatations nous amènent à formuler une problématique particulière. En somme, la forêt couvre 40 % des superficies terrestres, et le Canada en possède 10 % à lui seul, en majorité en milieu boréal. Le besoin de planification et de supervision que cette réalité entraîne n'a pu jusqu'ici qu'être imparfaitement rempli par les méthodes traditionnelles d'inventaire forestier, en particulier dans le domaine du volume ligneux, une mesure essentielle tant pour les ingénieurs forestiers de l'industrie que pour les chercheurs en écologie. La technologie de l'altimétrie laser, en développement depuis plusieurs années, semble prometteuse à cet égard. Il y a présentement un besoin pour diversifier les méthodologies de mesure allométrique afin d'évaluer et de cartographier le volume ligneux aux fins d'aménagement forestier. Il s'agit de chercher des techniques plus exactes, précises, rapides et fiables.

Notre objectif principal sera alors de valider des méthodes statistiques ou géométriques existantes de calcul du volume laser ou d'en mettre au point de nouvelles qui permettent d'obtenir une bonne adéquation avec les volumes ligneux mesurés sur le terrain, à l'échelle des peuplements (et non de l'arbre individuel). Certains objectifs plus spécifiques pourront porter sur : la contribution de l'essence à l'analyse; le comportement des modèles en situation d'extension par strate forestière; le mode de représentation visuelle des volumes; l'analyse de facteurs externes aux modèles; la mise en relation des volumes prédits avec les conditions écologiques des sites. En conséquence, nous nous sommes posé la question de recherche suivante : *les données d'altimétrie laser par balayage à haute résolution constituent-elles une voie de solution pour l'estimation du volume ligneux (celui d'une strate ou d'un peuplement plutôt que le volume individuel d'un arbre), en particulier pour le cas des forêts boréales, sachant que leur nouveauté fait en sorte que les méthodes de traitement restent à développer?* C'est l'objet de la présente recherche de répondre à cette interrogation.

CHAPITRE I

LA MESURE DU VOLUME LIGNEUX

Les façons traditionnelles de mesurer le volume ligneux seront évoquées plus bas.

1.1 Le volume ligneux

1.1.1 Mesure du volume ligneux d'un arbre

Plusieurs notions de volume peuvent être employées selon les circonstances et les domaines d'application (par exemple dans les inventaires de planification ou les bourses de matières premières). Le volume total ligneux, qui fera l'objet de notre étude, se définit comme le nombre de mètres cubes totaux de matière ligneuse donnée par les différentes parties structurelles exposées d'un arbre : tronc, branches, etc. On exclut donc généralement d'office la partie des racines et même la souche jusqu'à 0,3 m du sol. Par contre, le volume marchand brut restreint cette quantité de base en retranchant les gaulis (arbrisseaux d'un diamètre de 9 cm ou moins) et la partie de la couronne qui n'est pas exploitable, soit les branches d'un diamètre de 9 cm ou moins. Le volume marchand net quant à lui enlève à la fois l'écorce, les défauts et la carie. Dans tous ces cas, le volume d'un peuplement représente la somme des volumes individuels d'un groupe d'arbres de composition floristique et écologique homogène formant une unité spatiale intègre (Parent, 1990). Le volume d'une strate est quant à lui la somme des volumes d'un ensemble de peuplements assez similaires répartis sur un territoire homogène circonscrit dans un but précis (exploitation, loi, recherche).

En théorie, la détermination assez précise d'un volume quelconque passera par la mesure de diverses parties de l'arbre (Rondeux, 1993). À toutes fins pratiques, une grande exactitude n'est en général ni atteignable (sauf après coupe), ni même nécessaire. On peut viser soit à connaître certains paramètres de chaque arbre, soit à connaître des valeurs moyennes, cette dernière approche étant plus pratique dans le cas d'une évaluation extensive.

Quoi qu'il en soit, les variables principales influençant le volume et donc permettant sa mesure sont l'*essence*, la *hauteur*, le *diamètre* du tronc, la *couronne* et la *densité* spatiale, c'est-à-dire le nombre de tiges à l'hectare (Bérard et Côté, 1996). Le diamètre le plus couramment utilisé est le *diamètre à hauteur de poitrine* (DHP), c'est-à-dire le diamètre de l'arbre, en centimètres, à 1,3 m du sol. À partir du DHP, on dérive la *surface terrière*, qui est l'aire, en mètres carrés, du plan horizontal où passe le DHP dans l'arbre :

$$\begin{aligned} g &= \pi * \text{rayon}^2, \text{ soit} \\ &= \pi * (\text{DHP}/2)^2, \text{ soit} \\ &= \pi * (1/2)^2 * \text{DHP}^2, \text{ soit} \\ &= 0,7854 * \text{DHP}^2. \end{aligned}$$

Pour obtenir la surface terrière à l'hectare (10 000 m²), on a donc : $G = 0,00007854 * \text{DHP}^2$.

Les principales mesures dendrométriques à effectuer sur un arbre seront donc les suivantes :

- l'essence, identifiée par les caractéristiques physiologiques observables;
- le DHP, mesuré à l'aide d'un ruban forestier ou d'un compas spécialement construit (dans ce dernier cas, on prendra idéalement deux mesures à angle droit);
- la hauteur totale de l'arbre (H_a), autre mesure très utile mais qui demande plus d'effort et n'est donc pas toujours mesurée : on utilise l'hypsomètre lorsque c'est requis;
- parfois, plusieurs rayons de projection de la couronne sont mesurés à angle droit;
- de plus, une estimation de l'âge et de l'état de santé est souvent demandée;
- une estimation du pourcentage de couverture du feuillage est parfois faite (densité).

Les mesures directes du volume impliquent la destruction de l'arbre et sont donc rarement effectuées, sauf pour l'établissement de tables d'inventaires provinciales ou nationales. On a plutôt recours à des relations allométriques associant des paramètres explicatifs (H_a, DHP) selon ces tables basées sur des mesures destructives. Plusieurs chercheurs ont exploré les relations allométriques qui existent entre les différentes mesures dendrométriques (en Alberta par Bella, 1970; en Ontario par Payandeh, 1990). On sait par exemple qu'il existe une bonne relation entre le DHP et H_a, en particulier dans les plantations (Philip, 1994). Dawkins (1963) a aussi déterminé qu'il existe une relation linéaire entre le

diamètre de couronne et celui du tronc chez plusieurs arbres tropicaux, menant à un degré d'amplitude de la couronne (K/d) d'environ 10 chez les conifères et 20 chez les feuillus. Au cours des années, des recherches ont aussi relié le volume avec le DHP, H_a ou le recouvrement de canopée. Le volume est à son tour bien associé à la biomasse totale de l'arbre (poids sec hors terre). Les deux peuvent employer à la fois le DHP et H_a dans les équations de calcul (Wenger, 1984). On a typiquement 0,6 tonne de biomasse totale pour 1 mètre cube de bois. Johnson *et al.* (1990) ont trouvé que le poids de différentes parties d'un arbre (tronc, couronne) est corrélé avec le DHP. Bella (1970) obtint le même genre de courbe de croissance plafonnée avec l'âge, pour la biomasse et le volume du peuplier faux-tremble.

Le calcul du volume ligneux au Québec pour l'arbre individuel repose sur une équation de régression reliant le volume marchand brut au DHP et à la hauteur de cime, pour chaque essence. C'est ce qu'on appelle un *tarif de cubage* (Dagnelie *et al.*, 1985), dont il existe une version spécifique pour le Québec, réalisée à partir de 22 000 arbres. La déviation du modèle, pour environ 200 arbres-témoins par essence, est de plus ou moins 1 % (Perron, 1985). L'équation pour le volume d'un peuplier faux-tremble est donnée par :

$$\begin{aligned}
 & -1,5881596 * H_a + 0,0358535 * DHP^2 * H_a \quad \text{et, pour l'épinette blanche, par :} \\
 & -24,9889 + 4,90312 * DHP - 0,21366 * DHP^2 - 4,6912003 * H_a + 0,33143 * DHP * H_a \\
 & + 0,03131 * DHP^2 * H_a \quad (\text{volume en dm}^3 \text{ sous écorce, hauteur en m, DHP en cm}).
 \end{aligned}$$

À noter que la variance du volume augmente avec la dimension de l'arbre. Lorsque l'échantillonnage ne comprend pas de mesure systématique de hauteur (à cause d'un délai trop court), on doit alors calculer un tarif *local* c'est-à-dire une relation entre le DHP et H_a . À partir de ces données de base de l'inventaire, on peut obtenir différents tableaux sommaires de la situation. Parmi les compilations souvent faites, on trouve les tables de recouvrement, de peuplement (la densité), de rendement, de densité-hauteur, etc. (Ministère des Ressources naturelles du Québec [MRNQ], 1984). Ces tables sont conçues pour le niveau de détail de la strate.

Les facteurs écologiques déterminant la répartition des arbres et la création de matière ligneuse sont nombreux, dont l'âge de l'arbre et sa position sociale, les conditions de terrain (sol, climat) ou encore la densité du boisé, sans compter les facteurs génétiques individuels. Entre autres, la distinction entre *semper virens* (par exemple une épinette

blanche) et *décidus* (dont le peuplier faux-tremble), qui perdent leurs feuilles à certaines saisons de chaque année, est utile : la différence dans la situation des feuilles (dont leur absence en hiver) entraînera à la fois des complications dans les mesures forestières et des opportunités en télédétection. Au-delà de cette différence marquée, chaque essence recèle également une part de variabilité (architecture des parties) qui compliquera les évaluations.

1.1.2 Estimation du volume ligneux d'un peuplement

1.1.2.1 Les inventaires traditionnels

Nous présentons ici les différentes approches de mesure de paramètres forestiers, afin d'avoir une base de comparaison pour les nouvelles technologies. La méthode traditionnelle implique un inventaire sur le terrain. Il s'agit généralement de produire un portrait physique assez précis de la forêt en faisant un plan de sondage. On procède généralement par *échantillonnage*, en sélectionnant une partie des arbres, selon des transects (lignes droites à intervalle) ou des placettes (surfaces rectangulaires ou rondes) choisis dans un peuplement de façon aléatoire ou systématique (selon un critère de distance ou autre).

Un des types d'inventaire le plus utilisé est appelé aléatoire stratifié et consiste à diviser le territoire en zones selon un phénomène discriminant (drainage, flore, etc.) avant le choix au hasard, ce qui a pour effet d'augmenter l'exactitude tout en diminuant la variance (Cochran, 1972). Cet aspect de la prise en compte des erreurs de mesure a d'ailleurs des conséquences sur le nombre d'échantillons à prendre, 30 placettes étant généralement considéré comme le minimum statistiquement valable. Le choix des transects est souvent fait par photo-interprétation, en respectant des alignements de moins de 1 500 m et en établissant des placettes de 400 m² avec des piquets, pour localisation ultérieure (MRNQ, 1991). Les feuillets d'inventaire conservent les essences, les âges, les hauteurs et les DHP. Parmi les facteurs abiotiques les plus mesurés, on trouve la topographie (altitude, pente, exposition, rugosité du relief) et la composition du sol (dépôt, drainage, humidité ou capacité de rétention d'eau, nutriments disponibles).

Une fois que les données ont été colligées sur le terrain, diverses techniques sont employées selon les circonstances et les régions pour obtenir les quantités volumétriques de bois sous forme de tableaux. Cependant, certaines limites existent en terme de coûts et de précision. Morton *et al.* (1990) ont établi que ces calculs sont très bien faits au Québec par rapport à d'autres provinces ($r^2 = 0,99$) mais que, de toute manière, les résultats sont assez semblables, du moins pour le cas de l'épinette blanche.

1.1.2.2 Autres calculs et problèmes sous-jacents

Chaque province ou pays a mis au point ou prescrit une technique propre et des recherches se poursuivent pour améliorer la précision des modèles. Tel est le cas de Huang et Titus (1994), qui ont travaillé spécifiquement sur le calcul de H_a pour l'épinette blanche et le peuplier faux-tremble en Alberta, en ajoutant la densité, la productivité et les essences dominantes à un modèle exponentiel de base. Quant à Muhairwe *et al.* (1994), ils ont utilisé l'âge et des classes de site et de cime. Selon les forestiers eux-mêmes, la mesure de la hauteur, la variable la plus utile sur le terrain, est relativement difficile et imprécise, par exemple pour le peuplier faux-tremble (Service canadien des forêts, 1991). En effet, une cime large peut entraîner une surestimation tandis qu'une mauvaise position relative de l'observateur peut aussi induire des sous-estimations. La mesure du diamètre n'est pas non plus exempte de problèmes, le tronc n'étant pas un fût régulier. De plus, il est reconnu que les inventaires sur le terrain sont longs et coûteux - jusqu'à 6 \$ par arbre - à cause notamment des ressources humaines nécessaires (Avery, 1978). On tendra à limiter les surfaces échantillonnées, ce qui induira une fiabilité moins grande. Cela a aussi pour effet d'en limiter la répétitivité sur une base régulière. Par exemple, l'inventaire forestier supervisé par le ministère des Ressources naturelles du Québec (MRNQ) est une combinaison de données de terrain et de photos aériennes et a une périodicité décennale.

Afin de réduire la complexité des facteurs en cause, d'explorer de nouvelles relations, d'éviter les perturbations ou de visualiser des situations non reproductibles, la *modélisation* représente une technique essentielle que nous aurons à utiliser (*voir* chap. 4). Divers

modèles forestiers (statistiques, écologiques, etc.) ont été mis au point dans les dernières années, notamment par Burrows (1990), Botkin (1993) et Koesmarno *et al.* (1994). Carpentier *et al.* (1989) ont mis au point un modèle de croissance et l'ont testé avec le cas du peuplier : à partir d'une situation initiale déterminée par des tables de peuplement et des indices de qualité de station, on peut obtenir un portrait d'une forêt dans le temps. Dubrasich *et al.* (1997) se sont surtout penchés sur les peuplements (en Oregon) en tant que tels : ils voulaient obtenir une façon alternative, non intrusive, d'évaluer l'architecture des canopées dans un milieu d'espèce menacée. Dans une perspective plus large, Chen et Leblanc (1997) ont étudié des épinettes individuelles en simulant leur réflectance selon la BRDF («bidirectional reflectance distribution function»), dans laquelle l'arbre est assimilé à un objet localisé au hasard et dont les feuilles sont dans un milieu dit *turbide*, par la prise en compte du groupement des arbres et de la structure approximative interne des branches. On peut ainsi modéliser la réflectance, si importante en télédétection. Les modèles sont rarement indépendants de l'échelle à laquelle on les applique (paysage, peuplement, arbre) : c'est le sens du travail de Botkin (1993) et Nisset et Botkin (1993) sur JABOWA, qui modélise la croissance forestière à l'aide de multiples paramètres comme l'azote (et confirme qu'une essence intolérante à l'ombre pousse effectivement plus vite qu'une essence tolérante en terrain ensoleillé) mais qui exigerait d'autres variables pour le transposer à l'échelle du paysage.

1.2 L'évaluation du volume par télédétection

1.2.1 La photo aérienne

La photo aérienne est le moyen de télédétection passive le plus répandu en foresterie, avec l'aspect qualitatif nommé photo-interprétation et son pendant quantitatif, la photogrammétrie. La photo-interprétation classique au 1 : 20 000 réussit assez bien à distinguer les conifères des feuillus ou même à déterminer des essences commerciales (Spurr, 1960). Par contre, la photogrammétrie, qui permet de quantifier le recouvrement, c'est-à-dire la surface relative occupée par la canopée (par grille de points), a plus récemment tenté de mesurer par stéréoscopie la hauteur ou le volume, celui-ci étant alors fonction de la hauteur, du

recouvrement et du diamètre moyen de la couronne (Lillesand et Kiefer, 1987). Cette technique requière à la base une grande fiabilité de la localisation, ce qui n'est possible que depuis peu au centimètre près et, qui nécessite la présence de points de contrôle (Capellini *et al.*, 1991), une condition difficile à réaliser en forêt naturelle (Toth et Krupnik, 1996).

Ces techniques demeurent dépendantes de la compétence de l'interprète et de l'échelle de prise de vue (traditionnellement faites à 1 : 15 000 ou 1 : 20 000, ces photos ne sont fiables que pour des unités de sondage assez large). Par exemple, Kovats (1997) a proposé une méthode différentielle, précise mais coûteuse, pour les hauteurs sur appareil de restitution Zeiss, à partir de photos 1 : 1 000 en Colombie-Britannique. Lorsqu'on tente de réduire l'échelle, par exemple à 1 : 8 000, pour économiser les coûts, on n'arrive plus à «distinguer l'arbre de la forêt». Il en est de même pour la technologie numérique DVP au Québec avec laquelle on dépasse les 5 m d'erreur, une valeur trop grande pour les besoins actuels (Villemaire *et al.*, 1998). En outre, il est difficile de trouver la base des arbres en boisé dense avec des photos aériennes. Lowell (1997) a aussi utilisé des photos à plus grande échelle (1 : 10 000) dans le but de préciser les volumes par peuplement; à partir de traitements numériques pour extraire la densité de façon semi-automatique, il obtint une régression adéquate à 68 % mais la composante «hauteur» avait été prise sur le terrain et les essences provenaient d'une carte forestière. La technique de la photo aérienne est bien adaptée pour fins de vérification des travaux d'interprétation, lorsqu'elle est associée à de l'imagerie numérique (Campeau, 1993).

1.2.2 Les capteurs multispectraux passifs et actifs

Après la photo aérienne, on a développé des méthodes plus sophistiquées basées sur la radiométrie multispectrale, qui constitue en quelque sorte une photographie numérique à bandes spectrales multiples¹. Ses applications en foresterie ont varié de la classification grossière en conifères et feuillus à la mesure du recouvrement à une échelle assimilée à 1 : 15 000 (Énergie mines et ressources Canada, 1986), en passant par les indices de végétation (NDVI, TVI) servant d'analogie à l'indice foliaire («Leaf Area Index») dont certains furent corrélés à

la biomasse au sol, mais avec des limites d'échelle et de saturation (Chiao, 1994). La bande 4 (proche infrarouge) de Landsat TM est ainsi meilleure pour les conifères que pour les feuillus et sous- ou surestime la quantité de matière végétale selon la rugosité du terrain et le sous-bois. Wulder (1998) a fait une bonne revue de l'état des connaissances en matière de télédétection forestière : entre autres, la relation entre radiométrie et volume est assez faible mais, au total, meilleure pour les conifères. Divers calculs de texture ont été évalués, que ce soit l'auto-corrélation, le BRDF ou la tonalité NDVI pour l'indice foliaire, sans résultats utiles.

Les capteurs hyperspectraux, tels le CASI, offrent une voie prometteuse (Danson et Plummer, 1995). Le problème du radiomètre hyperspectral est son nécessaire étalonnage à des données radiométriques de terrain puisque les conditions optiques (ensoleillement, ennuagement) sont variables à tout moment de la captation (Fazakas et Nilsson, 1996). Selon Girard et Girard (1989), ce type de capteur ne donnerait son plein potentiel que lorsqu'on l'utilisera en trois modes simultanés : luminance locale, texture et région. À cet égard, l'analyse d'images par demi-variogramme pourrait inférer la densité (St-Onge *et al.*, 1998). Mais, une connaissance a priori des essences et une très haute résolution sont deux conditions qui en repoussent l'applicabilité. Les micro-ondes, tel qu'employées à basse résolution de 15 km sur le satellite SSM/I, ont été utilisées en foresterie, comme en Finlande où la bande L s'avéra moins mauvaise que la bande C mais sous- et surestima les volumes (Grandell *et al.*, 1998).

Parmi les capteurs *actifs* de télédétection (fondés sur l'émission d'un signal dont on recueillera un retour par la suite), le radar est un des plus utilisés². Certaines études ont visé à quantifier certains paramètres forestiers par cet instrument, car on peut obtenir des réflexions des végétaux pour certaines longueurs d'onde et polarisations (Ranson *et al.*, 1997). Jaton et Thomson (1994) rapportent des tests pour la détection des coupes et des chemins forestiers et l'âge des arbres. Fransson et Israelsson (1999) ont obtenu des résultats bons à 78 % avec la bande L du satellite JERS pour de grandes classes de volume en forêt coniférienne suédoise mais après étalonnage sur des surfaces de coupe.

Bien que le radar ait tendance à surestimer les volumes, paradoxalement son signal semble saturer à 150 m³/ha de biomasse. Harding *et al.* (1995) ont même comparé la hauteur

obtenue d'un LIDAR et d'un radar, ce dernier se révélant plus sensible au bruit et plus relatif qu'absolu dans ces mesures, à cause de l'influence de l'angle d'incidence et de la rugosité au sol. Cependant, ces instruments ne peuvent détecter les couches intermédiaires de végétation (Hecht, 1996).

1.3 L'exploitation des résultats dendrométriques obtenus par SIG et télédétection

1.3.1 L'utilisation des SIG et de la cartographie

Bien qu'il existe diverses méthodes de compilation et de calcul des séries de données générées par un inventaire, les SIG (systèmes d'information géographique) facilitent l'intégration de données multisources et multitemporelles d'une région donnée au moyen de divers traitements géométriques et statistiques. Un logiciel comme MapInfo permet l'analyse et la synthèse par l'utilisation conjointe de données vectorielles et matricielles et d'attributs. Il prend d'ailleurs en charge la gestion des bases de données qui y sont associées. Il faut cependant porter attention au problème de la superposition de données d'échelles différentes. Les SIG sont de plus en plus utilisés en foresterie, grâce à la création de banques de données spécialisées. La cartographie ajoute de l'impact à la présentation des résultats d'inventaire sous forme de tableaux. Les cartes traditionnelles en deux dimensions permettent la représentation de phénomènes statiques, discrets ou continus et, sont donc efficaces pour les cas de synthèse de l'information géographique. Cependant, la représentation de données géométriques comportant trois dimensions amène l'emploi de ce qu'on a appelé «carte en 2D½», c'est-à-dire en utilisant les effets de perspective. On trouvera à l'appendice B quatre exemples plus ou moins sophistiqués de ce type de représentation (respectivement : en fil de fer, avec ombrages, par filtrage et, avec superposition d'image). L'ajout d'un aspect temporel et mobile (animation) est aussi une option. Il existe d'ailleurs des logiciels spécialisés de modélisation en foresterie, tels SVS et FVS (Orland *et al.*, 1997).

1.3.2 Bilan de la télédétection forestière

En somme, l'inventaire par photographie aérienne est une technique bien implantée mais chère et limitée du point de vue de la mesure des volumes de bois, tandis que la radiométrie satellitaire ne peut actuellement fournir de mesures dendrométriques absolues et, ne le pourra peut-être jamais. Ces constatations ne sont pas étonnantes puisqu'on tente de relier une réalité géométrique à une autre qui ne l'est pas. Les résultats du radar semblent moins précis que ceux de certaines autres techniques pour ce type d'applications, entre autres à cause de la largeur spectrale du signal réfléchi et de l'influence de l'humidité sur la rétrodiffusion (Barrett et Curtis, 1992). De plus, l'altimétrie radar n'est pas fiable pour les terrains pentus. Son signal sature vers 10 ans d'âge (50 tonnes/ha de biomasse) et, un moyennage des signaux est nécessaire (Seshamani, 1993). Suite à ces expériences plus ou moins concluantes de la volumétrie du bois par inventaire ou par télédétection, un besoin de technologies offrant plus d'exactitude, de précision, de flexibilité, de vitesse et d'économie se fait donc sentir. L'utilisation du LIDAR à cette fin pourrait se révéler une solution pratique.

CHAPITRE II

L'ALTIMÉTRIE LASER

Une synthèse du LIDAR et de ses applications permettra un tour de l'état de la question.

2.1 Le LIDAR

2.1.1 Le potentiel du LIDAR pour les mesures dendrométriques

Les méthodes *in situ* ou de télédétection comportant des problèmes de diverse nature dans les applications forestières, on recherchera une technologie offrant une large couverture *et* une haute intensité d'échantillonnage qui s'appuie sur des mesures géométriques : l'altimétrie laser semble offrir ces perspectives. Le *LIDAR* ou «Light Detection And Ranging» est construit sur le principe de l'émission d'un signal lumineux discret ou continu vert, ultraviolet ou infrarouge et de la réception de sa portion réfléchié par tout objet intercepté, dans le chemin inverse (fig. 2.1). Le LIDAR est donc à la fois un instrument et une méthode de détection fondée sur les propriétés géométriques des objets à étudier. Il est alors susceptible de donner une évaluation directe de la morphologie du sol ou d'une surface, plutôt qu'une mesure obtenue indirectement par une relation. Parmi les applications déjà documentées du LIDAR, on retrouve notamment, en plus de la cartographie de Mars :

- les modèles numériques de surface (*MNS*) urbains ou pour l'aménagement du paysage et les modèles numériques de terrain ou *MNT* (Moreau et Jeudy, 1986; Kraus et Pfeifer, 1998);
- l'investigation des risques d'inondation (Murtagh, 1999);
- la bathymétrie, les vagues, la qualité de l'eau (algues) et le déversement de pétrole (Lyzenga, 1985);
- les propriétés atmosphériques (nuages, pollution, vents) et les relevés topographiques côtiers (NOAA, 2000);
- les opérations militaires en milieu inconnu et la surveillance des lignes hydroélectriques (Kmitta, 2000);
- le suivi des coupes forestières (*voir* sect. 2.2).

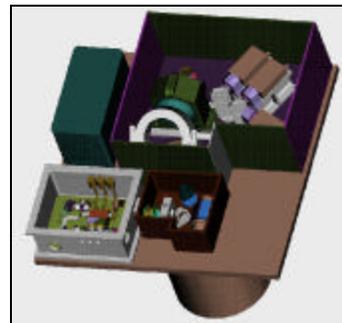


Figure 2.1 Schéma d'un LIDAR type (source : Anon., 2000).

Des lasers ont aussi été adaptés pour mesurer des arbres abattus sur le parterre de coupe : caméra BIRIS du Forest Engineering Research Institute of Canada; pour les mesurer sur pied : Forest Pro de Laser Technology Inc.; ou pour le contrôle en scierie : école Virginia Tech. Les avantages du LIDAR par rapport aux autres techniques de mesure déjà évoquées sont : la rapidité d'exécution (possibilité d'automatisation plus grande), la localisation en 3D sans points d'appui externes et avec un seul canal, le caractère non intrusif (Flood et Gutelius, 1997); l'exactitude (jusqu'à 5 cm verticalement), la possibilité de «voir» le sol à travers le couvert forestier ou ce dernier en tant que tel et ce, simultanément (Desbuisson, 1998); la flexibilité et la solidité (disponibilité de nuit, en zone inaccessible et, sur hélicoptère), l'insensibilité aux ombres ou aux faibles contrastes et l'interface directe aux SIG (Flood, 2000).

2.1.2 Le fonctionnement de l'altimétrie laser

Bien que les principes du LIDAR puissent en théorie se matérialiser dans diverses solutions techniques, il appert que, généralement, la source émettrice d'un LIDAR est un *laser* (Measures, 1984), pour «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation», une source de lumière cohérente hautement convergente (donc un rayon très fin). C'est pourquoi un LIDAR monté sur plate-forme aéroportée -incluant un hélicoptère- est souvent appelé un ALS («Airborne Laser System»). Ces systèmes sont appelés en français «altimètres laser aéroportés». Mais ce pourrait aussi être une lampe de type *flash*, comme ce fut le cas pour un test de Nelson *et al.* (1998), qui cependant ne trouva aucune relation significative avec l'indice foliaire ou le recouvrement. Le laser, mis au point par Maiman en 1960, a vu ses premières applications spatiales vers 1975, par les Français (Santerre et Bourgon, 1999) et les Américains (vols Apollo). C'est la mesure, par une horloge, du temps écoulé entre l'émission et la réception, par une photodiode (circuit imprimé), des photons du signal laser réfléchi qui donne la notion précise de la distance entre l'appareil et l'objet visé et, par calcul basé sur la vitesse de la lumière, de l'altitude, lorsque l'appareil fait un survol (Wehr et Lohr, 1999a). La figure 2.2 donne les éléments importants d'un altimètre laser opérationnel. Notons que la prise en compte des angles (du capteur, d'attitude de l'avion) est essentielle si on veut localiser chaque signal de retour dans l'espace.

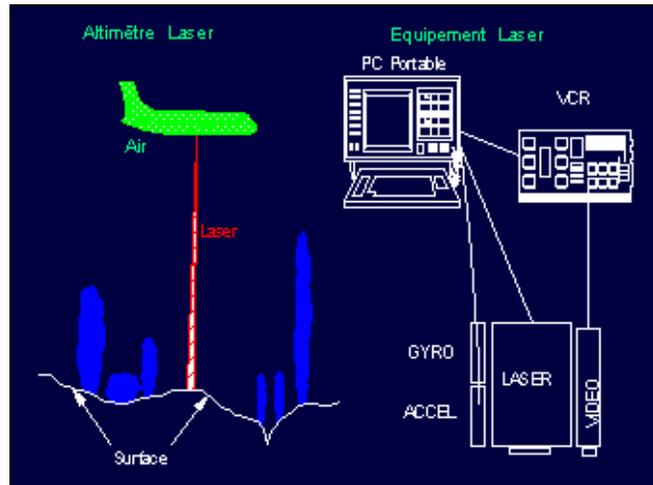


Figure 2.2 Fonctionnement d'un système LIDAR (d'après Ritchie *et al.*, 1992).

Les systèmes LIDAR ont diverses caractéristiques optiques, dont la tache au sol, plutôt ronde, et son diamètre qui est la conséquence de la divergence de l'*IFOV* («instantaneous field of view») en mrad (Measures, 1984). On partage actuellement les systèmes entre moyenne et haute résolution selon que la tache sera *grande* (plus de 5 m) ou *petite* (moins de 5 m). À titre indicatif, une photo aérienne d'échelle 1 : 15 000 a une «résolution» d'environ 18 cm (Wenger, 1984). D'autre part, le choix de la longueur d'onde émise a aussi son importance: la prévalence de l'infrarouge (autour de 1 000 nm) dans les systèmes commerciaux s'explique sans doute par la bonne réflectivité, à la fois des végétaux et des infrastructures humaines, pour cette plage spectrale.

L'emploi d'un laser à ondes *continues* plutôt que pulsées reste du domaine expérimental. C'est le cas également pour le traitement des mesures de *fluorescence* induite, testées pour mesurer la chlorophylle des cultures (mono- / dicotylédones), ou de *polarimétrie*, qui peuvent discriminer entre l'épinette et l'érable ou le peuplier (Kalshoven et Dabney, 1993). Notons d'ailleurs que d'autres auteurs ont parfois mentionné la possibilité d'utiliser les caractéristiques discriminantes du signal laser entre les saisons aux fins d'identification d'espèces végétales (l'approche «avec feuilles / sans feuilles»). Cependant, ces tests profiteraient d'une association avec des instruments radiométriques. Plusieurs capteurs aéroportés ont été testés au cours des dernières années, dont certains commerciaux (Optech, TopoSys, EagleScan, Saab, etc.).

Chaque système se distingue par la ou les longueurs d'onde utilisées et par sa capacité de traiter un ou plusieurs retours, ou même l'amplitude de ceux-ci, en mode discret ou continu (Baltsavias, 1999c). Enfin, un aspect important est la distinction entre les *télémètres*, dont les mesures sont isolées (Million, 1990), les *profilomètres* (trace continue fine, en x seulement) et les *balayeurs*, ces derniers pouvant opérer dans les axes x et y en continu (ce qui permet en pratique des mesures de terrain par bande assez large). Dans ce dernier cas, le faisceau laser est souvent réfléchi au sol par un miroir en une série d'incrémentes produits par moteur, ce qui donne une trace elliptique (miroir rotatif) ou en zigzag (miroir oscillant). Un inventaire de végétation par LIDAR typique comprend les étapes suivantes: 1) un survol du LIDAR produit des triplets x,y,z; 2) le premier retour du rayon laser (végétation) est séparé du dernier retour (sol) en temps réel ou en post-traitement; 3) les retours du sol sont interpolés pour générer un MNT; 4) le MNT est soustrait des premiers retours afin de calculer les hauteurs de canopée situées à des points x, y donnés; 5) des paramètres forestiers sont prédits.

La combinaison des fréquences d'impulsion et de balayage du signal laser et de la vitesse de l'avion donne un intervalle moyen d'échantillonnage, par exemple une impulsion par mètre. Afin de localiser l'objet atteint avec quelque précision horizontalement et verticalement, des systèmes auxiliaires sont depuis peu couplés au capteur : ce sont l'INS, système inertiel de navigation, et le GPS, système de positionnement global. La fréquence de mesure du LIDAR étant généralement plus élevée que celle de l'instrumentation avionique, la trajectoire de l'avion devra être interpolée pour chaque retour du signal laser. Dans le cas du GPS, il est maintenant possible d'améliorer ses mesures par l'emploi d'une station au sol qui corrige la lecture du GPS de l'avion. Des algorithmes nouveaux sont nécessaires pour le traitement avancé des données (Wehr et Lohr, 1999b). La prochaine génération de capteurs LIDAR permettra sans doute une plus grande flexibilité (choix de paramètres de mesure) et une intégration des images à d'autres senseurs.

Selon Baltsavias (1999b), l'exactitude de la mesure en trois dimensions est sujette à diverses formes d'erreur sur : la portée en z (qualité de numérisation, bruit), la position en x,y (co-registation des différents matériels) et la direction du rayon (fréquence d'INS, intégration du GPS). Certains artefacts (biais) sont induits par le LIDAR : proportion

d'impulsions non réfléchies, effets de pente, sensibilité aux nuages et, l'inconstance entre les saisons en zone tempérée (le coefficient de pénétration peut changer de 20 % à 70 % selon le type de forêt). L'efficacité en forêt tropicale est aussi une question d'intérêt. Par rapport au radar, le LIDAR a un taux d'impulsion plus rapide, une capacité énergétique plus forte et des ondes plus courtes, ce qui aboutit en fin de compte à un signal moins divergent. Par contre, le radar semble pouvoir lui faire compétition pour la réalisation de MNT de précision et d'échelle réduite, à plus de 50 m de côté de pixel (comme on a pu le voir d'ailleurs avec une mission récente de la navette spatiale). Le radar a cependant une précision spatiale moins grande en milieu forestier car les ondes pénètrent mal le couvert. De fait, l'altimétrie laser est déjà bien implantée pour l'analyse de terrain, notamment aux Pays-Bas où on l'utilise couramment pour la morphologie côtière et fluviale, avec un taux d'échantillonnage d'un point aux 16 m² et une exactitude de 10 cm (Huising et Gomes Pereira, 1998). Ces auteurs, de même qu'Axelsson (1999), dans un milieu plus urbain, mettent l'accent sur l'importance des algorithmes de filtrage, de classification et de modélisation : élimination du bruit, séparation des objets, interpolation par «spline», mosaïques de plusieurs images voisines. Une technique d'avenir pour le LIDAR est l'analyse du signal de retour en continu (plutôt que quelques retours discrets) : on peut ainsi voir la courbe d'atténuation de la canopée vers le sol; le survol d'un LIDAR de 904 nm en Virginie montra que la forêt reflète plus le signal que les routes, mais moins que les champs ou l'eau (Lin, 1997).

2.2 Les applications du LIDAR en foresterie

Les mesures qui sont principalement recherchées dans ce cas touchent à la forme du terrain, à la hauteur des arbres et à leur densité, à l'essence comme telle ainsi qu'au volume et à la biomasse. La carte de la figure 2.3 donne un aperçu des endroits et du genre de tests effectués dans le monde. La période d'expérimentation dépasse les 30 ans : cela va des premiers chercheurs qui ont touché indirectement à la mesure de végétaux lors de la mise au point des systèmes dans les années 60-70 aux vols d'hélicoptère visant la détection des changements du paysage australien en l'an 2000. Notons que des chercheurs ont utilisé l'altimétrie laser avec de petits végétaux : tel est le cas de Vanderbilt *et al.* (1990) qui

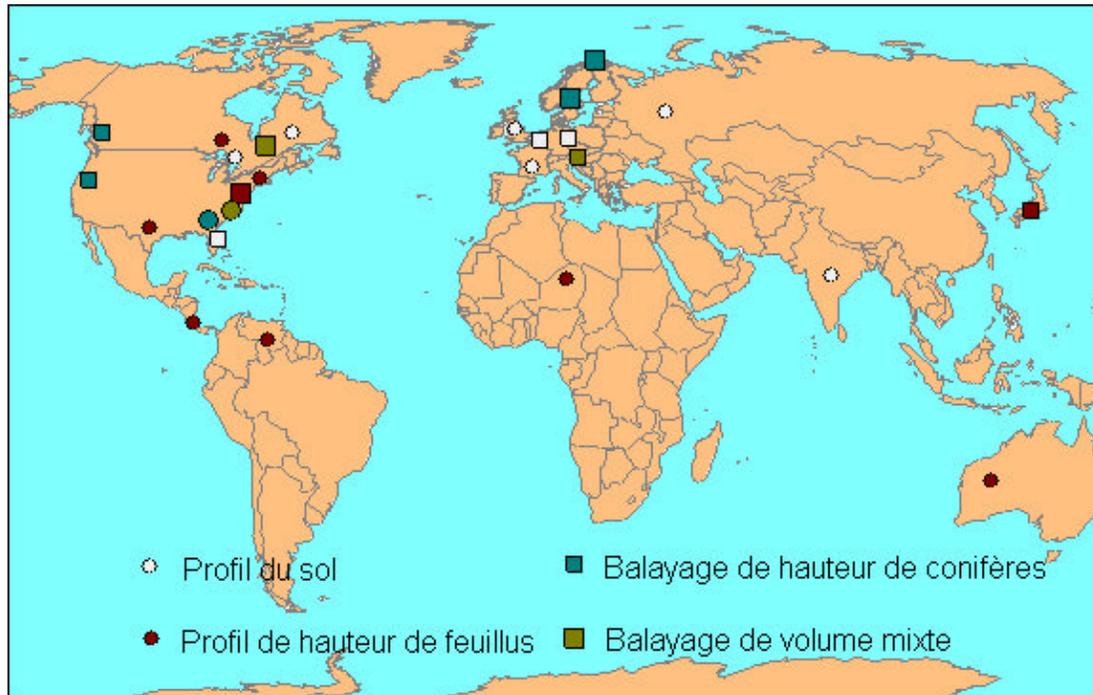


Figure 2.3 Principaux tests de LIDAR dans le monde.

tentèrent avec succès de caractériser l'architecture d'un champs de maïs à partir d'un bras mobile, la nuit. Il sera plus utile de revoir les principales expériences effectuées dans le domaine forestier comme tel (*voir* tabl. 3.1 pour un aperçu des systèmes existants).

Une des premières prises de données de LIDAR spécifique pour la forêt fut effectuée en 1976 au Venezuela (Arp *et al.*, 1982). Dans un milieu tropical dense, l'identification de la base des arbres sur photo est plus difficile, ce qui explique l'intérêt du LIDAR. Un autre test en milieu tropical a eu lieu au Costa Rica en 1984 (Nelson *et al.*, 1997). Les régressions obtenues par rapport aux données de terrain ont permis les relations suivantes :

$$\text{Surface terrière} = f(\text{hauteur, coefficient de variation});$$

$$\text{Ln(volume)} = a_0 + a_1 * \mu(\text{hauteur});$$

$$\text{Biomasse} = a_0 + a_1 * \ln(\text{DHP}^2 * \text{hauteur}).$$

Suite aux tests plus techniques de Krabill *et al.* (1984) en forêt mixte, Nelson (1984) étudia également la forêt feuillue tempérée avec le même appareillage. Il se pencha alors sur la capacité de pénétration du signal selon la distance parcourue (rappelons que la «fenêtre»

verticale d'un LIDAR dépend d'une part de la plus basse altitude de survol permise par les autorités et d'autre part de la portée maximale du signal laser). Il établit des ratios de réception sur émission et de signaux de canopée sur signaux de sol : moins le signal revient du sol, plus on a affaire à une structure dense. En outre un boisé défolié verra sa hauteur sous-estimée jusqu'à 10 %. Il remarqua enfin que tout cela n'est pas suffisant pour obtenir des volumes ou des biomasses car ceux-ci dépendent des essences.

L'étude des conifères fournit à Nelson *et al.* (1988a/b) l'occasion d'ébaucher une hypothèse relativement à la sous-estimation des hauteurs d'arbre généralement constatée dans la littérature (par exemple, Aldred et Bonnor (1985) ont obtenu une différence négative de 4 m) : à cause des interactions entre l'angle de visée du LIDAR et la forme des arbres, il s'ensuit que le premier point de contact est souvent latéral par rapport au sommet de la canopée. Il étayait leur hypothèse en remarquant que la variabilité en hauteur est plus faible chez les feuillus que les conifères et lorsque le recouvrement est fort. Ils dressent par la suite une équation de volume : $\ln(\text{volume}) = a_0 * (\text{hauteur}) + a_1 * (\ln(\text{hauteur})) + a_2$. Cependant les résultats (supérieurs à 90 %) sont très inégaux parmi les placettes. Le DHP, qui est une composante importante du volume, variant passablement entre les placettes, de là les résultats inconstants. Enfin une discrimination par espèce de pin n'améliore pas les résultats. Dans une autre étude *simulant* cette fois des profils de LIDAR, Nelson (1997) émit l'hypothèse que les mesures de hauteur d'arbre par LIDAR étaient en fait dépendantes de la forme des arbres, de là la sous-estimation systématique d'environ 3 m qui avait été remarquée dans le passé. Dans cette perspective, le cône (par exemple le sapin) est la pire forme à utiliser dans un modèle et, à l'autre extrême, on a la sphère; en l'absence de connaissances a priori, il faudrait donc choisir une parabole ou une ellipse dans un modèle géométrique de la canopée.

Dans la même période, d'autres chercheurs firent des tests différents, dont Schreier *et al.* (1984). Ils s'intéressèrent surtout à l'établissement de MNT à l'aide du LIDAR. Dans cette perspective, la végétation était plutôt une nuisance : le signal de retour en milieu végétal est plus diffusé et plus «bruité» que son corollaire en sol nu. Établissant leur vérité-terrain à partir d'une méthode photogrammétrique, ils détectèrent certains des problèmes

attribués à cette technique : en particulier l'élasticité du support (pellicule), l'orientation en stéréopaire et la subjectivité de l'opérateur. Ils notèrent aussi que l'ajout d'un système de compensation inertiel à la photogrammétrie avait pour effet de réduire de moitié l'erreur en z. Enfin, ils obtinrent un classement en feuillus, conifères, sol nu, eau et arbustes. La contribution de Maclean et Martin (1984) a été plus significative. Ils avaient d'abord validé une méthode photogrammétrique (mise de l'avant par le chercheur allemand Hugershoff dans les années 1920), par laquelle le volume était corrélé à 0,8 de r^2 au «profil» (aire sous la courbe entre le sol et le dessus de la canopée) et ce, par espèce dominante (l'essence ayant les individus les plus grands dans la zone). La méthode fonctionnait également en forêt inéquienne (ou d'âge variable). Maclean et Krabill (1986) ont donc cherché à répéter ces résultats, mais en prenant cette fois le LIDAR pour établir les profils. Ils obtinrent un r^2 de 0,9 mais seulement lorsqu'il eurent discriminé par l'essence, en plus d'ajuster la courbe par un logarithme et d'exclure les premiers 10 m de hauteur. Avec ajustement, la méthode serait donc meilleure que l'équivalent photogrammétrique. Ritchie *et al.* (1992, 1996) ont aussi travaillé avec un profilomètre, surtout en milieu semi-aride au Texas et au Niger, ainsi que Weltz *et al.* (1994) en Arizona (voir fig. 2.4): leur contribution à la foresterie touche surtout au recouvrement moyen, pour lequel ils ont trouvé des r^2 de 0,89, avec moins de 10 % d'erreur.

Des perfectionnements importants ont touché le domaine du LIDAR depuis quelques années avec l'arrivée des systèmes à balayage (typiquement 500 m de large) et leur couplage à des systèmes de correction de la position : l'INS qui sert à redresser les mesures en fonction des mouvements de l'avion sur lui-même et le GPS qu'on utilise plutôt pour établir

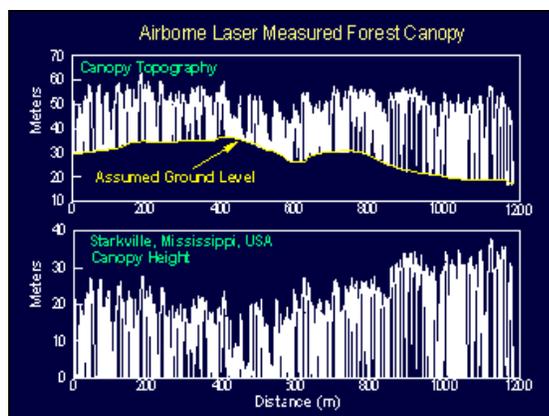


Figure 2.4 Exemple d'altimétrie en forêt avec un profilomètre (source : Ritchie *et al.*, 1992).

la localisation de l'avion dans l'espace. C'est dans ces conditions que Nilsson (1996) a tenté de mesurer le volume. Malheureusement, le système GPS n'a pas bien fonctionné (delta = 35 m), ce qui l'a obligé à dégrader son groupe d'échantillons dans une grille à 0,5 m dans une tentative pour trouver des points amers de recalage. Ses résultats de 0,78 de r^2 pour le modèle : volume de peuplement = μ (hauteur*aire de l'onde) sont donc susceptibles d'être remis en cause. Une observation intéressante consiste à prendre la mesure de temps de retour en dehors des centres de pic («85 % lead» ou «10 % late») pour améliorer légèrement la prédiction de la distance, même si le centre des premier et dernier pics de retour reste valable comme méthode.

Malgré tout, la recherche reliée au volume à l'aide de systèmes à balayage s'est intensifiée depuis. Par exemple, Naesset (1997a, 1997b) est un chercheur qui a confirmé par un système de grilles superposées aux données de LIDAR, dont il extrait le point le plus haut de chaque carreau, la possibilité d'obtenir moins de 2m de haut de divergence en moyenne entre les données de terrain et de LIDAR, indépendamment des essences (pin, épinette). Il reprend ses données pour en analyser le potentiel volumétrique. Il compare, d'une part, des volumes marchands pour 36 peuplements (moyennes du volume de placettes calculé par une équation de tarif de cubage par individu) et, d'autre part, des volumes de peuplement générés :

$$V = (\text{hauteurs laser moyennes})^{\text{puissance}} * \text{dominantes}^{\text{puissance}} \text{ (sur grille de 15 m par 15 m).}$$

Il obtient des r^2 jusqu'à 0,8 et avec de fortes variations locales, sans contribution de l'essence, de l'âge ou de l'angle du signal laser. Il suggère enfin d'analyser plus à fond l'effet de la densité d'échantillonnage sur les résultats. Magnussen et Boudewyn (1998) reprennent en partie le travail de Naesset sur les hauteurs pour en expliciter certains éléments. Selon eux, la technique de la grille est reliée au concept de rang centile et s'explique par la présence d'arbres dominants. Ils réduisent en conséquence l'écart de 3 m à 0,3 en comparant une grille de 20 x 20 m à la hauteur de Lorey (pondérée par la surface). Selon eux, les facteurs importants de la prise de données sont la densité d'échantillonnage, la réduction de la tache et un positionnement précis mais, pas l'angle de visée (moins de 0,5 % d'influence), contrairement à la télédétection optique. À titre de comparaison, Nilsson (1996) s'est interrogé, comme d'autres chercheurs, sur l'influence de cet angle de captation sur les résultats (l'angle devient potentiellement plus grand lorsqu'on utilise un balayeur à la place

d'un profilomètre puisqu'on vise alors de côté) et a suggéré 0,5 à 2,5 m d'erreur induite. Magnussen et Boudewyn (1998) ouvrent également des opportunités intéressantes quant à la bonne confection d'un MNT, au filtrage des points laser, à la confection des modèles et au test des relations. Leur modèle relié à l'indice foliaire des feuilles (LAI) semble par contre moins convaincant. Par la suite, Magnussen *et al.* (1999) s'attaquent à la faiblesse de la méthode par grille, qui est de nécessiter une connaissance a priori du terrain. Ils établissent deux modèles qui cherchent à redresser la hauteur prédite par le LIDAR, l'un étant la probabilité cumulative en fonction de l'aire de la couronne à cette hauteur et l'autre, plus particulier, basé sur la profondeur de canopée, et les compare à la hauteur moyenne, minimum, maximum, de Lorey et au 85^e centile. Dans ce dernier cas, avec le premier modèle, ils obtiennent 0,5 m de divergence, bon à 0,6 de r^2 mais avec une grande variabilité qu'ils attribuent à l'influence des arbres opprimés (non visibles des airs) et au mauvais positionnement des données (15 % à côté).

Certains problèmes sont causés par le traitement postérieur à la saisie, notamment dans l'interpolation d'un MNT. Selon Rieger *et al.* (2000), la distribution verticale des points par rapport à l'horizontale ne devrait pas être arbitraire, contrairement à ce qu'ils observèrent. Un premier résultat bon à 0,95 de r^2 est obtenu pour le recouvrement en conifère. Un deuxième résultat concerne le modèle : hauteur de 3 arbres dominants = 90^e centile du signal laser, bon à plus de 0,8 de r^2 . L'idée de se servir de données prises l'hiver pour construire les MNT et de données prises l'été pour mesurer la végétation est intéressante quoique, peut-être pas justifiable économiquement. Par ailleurs, Kraus et Rieger (1999) observèrent que les détails géomorphologiques sont indétectables sous les boisés.

Changer d'échelle de calcul, c'est-à-dire mesurer des arbres individuels, est un saut qui a été permis par l'augmentation constante de la densité d'échantillonnage. L'emploi du balayage en faisceau est alors important car il contribue une information supplémentaire : le voisinage de plusieurs points dans les trois axes permet de localiser un sommet individuel, ne serait-ce que manuellement. Les résultats de St-Onge (2000), qui semble le premier chercheur à tenter cette approche, suivent à 1,4 m près en moyenne les hauteurs prises sur le terrain, la divergence augmentant à l'inverse de la surface de couronne exposée. Ce

chercheur s'interroge cependant sur la meilleure façon de calculer les hauteurs étant donné la structuration particulière des mesures laser (l'ensemble des points au sol est indépendant de l'ensemble des points de végétation) et, sur la précision des données de terrain disponibles.

À un autre bout du spectre de résolution spatiale et spectrale se situe le LIDAR de moyenne résolution (à grande tache) et à échantillonnage complet de courbe (pour la structure interne de la canopée) tel qu'utilisé par Lefsky *et al.* (1999). Un aspect intéressant de cette étude est la relation qui est établie, d'une part, entre la hauteur maximale d'un échantillon et la biomasse et, d'autre part, entre la moyenne de hauteur et la surface terrière, ceci à partir de données de terrain. Par contre, l'appareil d'altimétrie laser utilisé fut incapable d'obtenir des mesures fiables de ces paramètres, dans un milieu feuillu (précédemment, Lefsky *et al.*, 1998, avaient obtenu un r^2 supérieur à 0,9 dans une forêt de conifères de l'Ouest). Cependant, une tache de 10 m devrait permettre d'estimer la hauteur maximale de canopée, puisqu'elle est plus large qu'un arbre. Avec Means et Swenson (1999) et Means *et al.* (1999), ils ont aussi comparé les deux types de LIDAR. Lefsky *et al.* (2000) ont également tenté d'étendre géographiquement les résultats à l'aide d'images Landsat ETM+. Ce type de LIDAR à grande tache est d'ailleurs destiné à une utilisation spatiale (Blair et Hofton, 1999). D'autres appareils, le SLA (tache : 100 m) et le SLICER (tache : 50 m), volèrent à bord de navettes. Des missions appelées «Vegetation Canopy LIDAR» (VCL) et «Geoscience Laser Altimeter System» (GLAS) se préparent pour l'année 2001 (Garvin, 1997).

Baltsavias (1999a) a comparé la photogrammétrie et l'altimétrie laser d'un point de vue théorique, puisque les deux peuvent servir à mesurer des surfaces en trois dimensions. Les différences principales entre les deux technologies sont : un mode passif plutôt qu'actif, une géométrie en perspective plutôt que polaire, des mesures de surface plutôt que des points, un accès à la 3^e dimension indirect plutôt que direct. Les avantages de la photogrammétrie sont surtout : un matériel moins cher et plus simple pour les survols, une couverture trois fois plus grande (à conditions égales) et un pixel dix fois plus petit. Par contre, le LIDAR est insensible aux conditions atmosphériques et aux ombres, est déjà géocodé en trois dimensions, a un plus fort potentiel d'automatisation et est meilleur pour isoler des objets. En conséquence, Baltsavias recommande d'utiliser l'altimétrie laser en

particulier pour : les milieux urbains, côtiers et forestiers, les mesures de haute précision, la gestion des catastrophes et les structures minces (lignes électriques).

2.3 Une synthèse de l'état de la question

2.3.1 Le bilan de l'utilisation du LIDAR

Le volume ligneux et la productivité forestière sont des données utiles dans la gestion des ressources, l'aménagement forestier et l'avancement des connaissances en écologie forestière et en biogéographie. L'évaluation du volume ligneux peut se faire sur le terrain ou par stéréophotogrammétrie (MRNQ, 1998). Cependant, la télédétection pourrait fournir plus rapidement et à plus bas coût des cartes plus précises de distribution de ces volumes. Les approches par télédétection classique n'ont pas fourni jusqu'à présent des résultats probants, le caractère non géométrique des capteurs optiques en constituant sans doute la raison. Une exception existe pour l'analyse des essences et des hauteurs par LIDAR (Naesset, 1997a; St-Onge, 2000; etc.). Le calcul optimal d'un volume forestier à partir de données d'altimétrie laser faisant encore l'objet de débats, il serait opportun d'analyser la contribution de chacun des paramètres déterminants de cette technologie aux mesures. Le fait d'employer un balayeur plutôt qu'un profilomètre ou un télémètre augmente l'utilité des tests puisque chaque axe géométrique de plus ajoute effectivement de l'information supplémentaire. La grandeur de tache a une influence, dans la mesure où plus elle sera petite, plus le signal de retour sera spécifique à une surface (équivalent à la résolution). Un intervalle d'impulsions petit amènera aussi un échantillonnage plus précis de la zone car la densité des points sera plus élevée. Par ailleurs, plus exacte sera la localisation physique de la trace en x, y, z, plus la comparaison avec les données de terrain sera significative, en autant que le positionnement des données de terrain d'un dispositif expérimental soit aussi exact.

Le degré d'automatisation actuel du processus de collecte de données d'altimétrie laser est d'un grand secours. Mais, au fur et à mesure qu'on s'éloigne d'une simple vérification de la mesure du sol, le niveau de difficulté augmente. Ainsi en est-il quand on passe du

MNT à la hauteur des arbres, à leur densité, puis au volume ligneux et à la biomasse. La complexité de la forêt observée a aussi une influence, une plantation de pins équiennes ne présentant pas les mêmes variations géométriques qu'un boisé naturel mixte inéquien. Le fait de ne travailler qu'avec *un* signal de retour discret, au lieu de plusieurs ou même de leur amplitude complète, interdit certaines analyses plus sophistiquées (sur l'espace vide). Ce désavantage pourrait être compensé en partie par l'emploi de modes d'analyse plus poussés (par exemple, un modèle géométrique sophistiqué au lieu d'une simple moyenne de hauteurs). Enfin, le degré de précision recherché est aussi un facteur : quand on passe de la strate au peuplement, puis à la placette et même à l'individu, le niveau de difficulté augmente.

Tout en ayant ces facteurs à l'esprit, synthétisons les quelques expériences passées sur le volume. Nelson *et al.* (1988a, 1997), défrichant en quelque sorte le terrain, se sont concentrés sur des corrélations linéaires simples. Maclean et Krabill (1986) se sont appuyés sur un corpus théorique plus solide (l'aire sous la courbe photogrammétrique). Mais ces chercheurs utilisaient une technologie qui est maintenant plutôt dépassée (le profilomètre). Nilsson (1996) n'avait pas un appareillage au point, ce qui a entaché ses résultats d'inexactitude. Plus récemment, Naasset (1997b) est le chercheur ayant obtenu le meilleur taux de succès dans ce domaine, mais en pinède équiennes seulement et ce, sans fondements théoriques appuyés. Magnussen *et al.* (1999) ne se sont pas attaqués principalement au volume comme tel mais ont quand même établi les principes qui avaient permis au chercheur Naasset d'avoir un certain succès.

Si on examine les principales expériences effectuées dans le passé avec des données d'altimétrie laser dans le domaine forestier, on constate que les aspects suivants restent donc en suspens pour donner plus de crédibilité à ces techniques :

- on n'a pas comparé des mesures de volume faites par placette d'échantillonnage;
- on n'a jamais utilisé un intervalle de points de moins de 2 m en même temps qu'une tache de moins de 20 cm pour mesurer le volume;
- on a rarement utilisé une approche volumétrique comme base de calcul du volume;
- on ne semble pas avoir calculé des volumes d'arbre individuels;
- on a très peu testé le LIDAR en région boréale feuillue ou mixte;

- on a rarement reproduit un même test de hauteurs plusieurs fois;
- on a peu quantifié l'effet de la qualité du MNT sur l'évaluation des hauteurs ou des volumes;
- on a mal testé le LIDAR en combinaison avec des images vidéo(Currie *et al.*, 1989).

Avec la disponibilité de capteurs de plus en plus variés, une certaine spécialisation des applications semble se dessiner. Entre autres, il apparaît logique d'attribuer à des capteurs radiométriques la mesure de propriétés optiques de l'objet d'étude (eu égard au secteur forestier, la couleur des parties ensoleillées ou ombragées par exemple) tandis que des capteurs géométriques prendraient en charge d'autres mesures comme la hauteur ou la forme. Avec une résolution et une qualité de positionnement de plus en plus grande, le mariage des résultats donnés par plusieurs senseurs à la fois semble une approche prometteuse, une possible révolution (Ackermann, 1999). Pour l'heure, notre intérêt se portant sur le volume, une mesure plutôt géométrique, la technologie du LIDAR offre sans doute la meilleure piste de recherche. Qu'en conclure à propos de la méthodologie à choisir pour résoudre les derniers problèmes et ainsi accélérer l'adoption de cette technologie dans le domaine forestier ? Que la combinaison d'un signal laser par *balayage* et à *haute* résolution (petite tache), d'une intensité d'échantillonnage *augmentée*, d'un positionnement *exact* par INS-GPS et d'un modèle *volumétrique* approprié est la voie à suivre, avec des mesures et des tests *par placette* et en forêt boréale *mixte* (feuillus *et* conifères).

2.3.2 Le question spécifique et les hypothèses de recherche

Nous sommes donc amenés à nous poser une question de recherche plus spécifique : *les données d'altimétrie laser par balayage à haute résolution constituent-elles une voie de solution pour l'estimation du volume ligneux (celui d'une strate ou d'un peuplement plutôt que le volume individuel d'un arbre), en particulier pour le cas des forêts boréales, sachant que leur nouveauté fait en sorte que les méthodes de traitement restent à développer ?* L'objectif principal sera alors de valider des méthodes statistiques ou géométriques

existantes de calcul du volume laser ou d'en mettre au point de nouvelles qui permettent d'obtenir une bonne adéquation avec les volumes ligneux mesurés sur le terrain, à l'échelle des peuplements (et non de l'arbre individuel). Certains objectifs subsidiaires pourront porter sur :

- la contribution de l'essence à l'analyse (identifiée par images multispectrales à très haute résolution);
- le comportement des modèles en situation d'extension territoriale (par strate forestière);
- le mode de représentation visuelle des volumes : carte 2D, 2D½ vues animées, etc.;
- l'analyse de facteurs externes aux modèles (l'angle de visée de l'avion, la densité de couverture des arbres, le taux de pénétration du signal laser);
- la mise en relation des volumes prédits avec les conditions écologiques des sites (dépôt, drainage, pente, âge des arbres), donc une possibilité d'établir un rapport indirect avec la productivité forestière (Odum, 1986).

Certaines hypothèses préalables se dégagent déjà avant d'avoir traité les données : par exemple, il est possible de relier des contenances calculées par balayage d'un signal laser à des volumes de terrain mesurés par placette, à condition d'avoir des données bien localisées. On sait aussi que la prise en compte de l'essence forestière améliore les modèles. De plus, un échantillonnage précis de haute densité et résolution raffine les résultats. Enfin, certains facteurs externes à déterminer pourraient expliquer la variabilité.

La pertinence de cette recherche découle de ce que la mesure du volume ligneux aux fins d'inventaires forestiers est une activité qui intéresse les divers acteurs concernés, depuis longtemps et ce, partout à travers le monde : États-unis, Canada, tropiques, Québec, Amérique latine (Chapman et Meyer, 1949; Watt, 1983; Defourny, 1994; Beaucher, 1997; Araya, 1999). On a pu voir récemment la capacité des gouvernements dans ce domaine, entre autres celle du ministère des Ressources naturelles au Québec, être remise en question dans le film réalisé par Richard Desjardins et Robert Monderie et qui s'intitule «L'erreur boréale». Par ailleurs, l'industrie forestière a un besoin plus pragmatique visant la planification à court et moyen terme des approvisionnements d'usine, selon la localisation possible des

coupes à échelonner dans le temps. De plus, les chercheurs de diverses disciplines, dont la biologie végétale et l'écologie, se servent de ces quantités comme intrants dans plusieurs modèles biophysiques : indices d'inflammabilité, impacts des pluies acides (selon l'hypothèse d'une réduction de croissance des arbres de 40 % en forêt boréale québécoise), cycles du carbone, réchauffement de l'atmosphère (Hunsaker *et al.*, 1993; Sicotte, 1999).

Tel que nous l'avons vu au début de ce chapitre, diverses techniques ont été utilisées dans le passé pour évaluer le volume ligneux, avec des résultats qui ne sont pas tout à fait aussi fiables qu'on le souhaiterait. Le domaine de recherche qu'est l'altimétrie laser offre une voie de solution mais tend à se diffuser lentement vers l'industrie forestière. Néanmoins, la combinaison d'un signal laser par balayage et à plus haute résolution, d'une intensité d'échantillonnage augmentée, d'un positionnement plus exact par INS-GPS et d'un modèle volumétrique plus approprié devrait résoudre les dernières difficultés liées à cette technologie. Nous espérons, dans l'éventualité d'un succès des mesures par placette en forêt boréale mixte, que la valeur économique et technologique du LIDAR par rapport aux méthodes courantes sera reconnue par les décideurs du monde forestier québécois. L'adoption de l'altimétrie laser comme stratégie d'inventaire complémentaire aux méthodes courantes pourrait signifier une meilleure planification de l'usage des forêts et donc une gestion plus durable des milieux naturels.

CHAPITRE III

LA RÉGION D'ÉTUDE ET LES RESSOURCES UTILISÉES

Dans toute recherche de type géographique, la donnée sur le lieu choisi est cruciale.

3.1 La région d'étude

La région d'étude est la zone de conservation de la Forêt d'Enseignement et de Recherche du Lac Duparquet (FERLD), située en forêt boréale mixte (domaine de la sapinière à bouleau blanc), localisée à environ 48°30' de latitude nord par 79°20' de longitude ouest, en Abitibi, au Québec (fig. 3.1). La région est à une altitude de moins de 400 m, a une température annuelle moyenne de 0,8 °C, sans gel pendant 64 jours et, avec une pluviosité de 857 mm par an (GREF-I, 1997). Les sols sont de type luvisols gris de la «Ceinture d'argile». Des feux majeurs ont eu lieu en 1760, 1797, 1823, 1847, 1870, 1916 et 1944 et la tordeuse des bourgeons a sévi surtout entre les années 1970 et 1987. D'autre part, on a récemment constaté que plusieurs coupes de bois ont été effectuées surtout dans la première moitié du 20^e siècle dans cette zone. L'évolution des peuplements non perturbés suit la séquence : tremble → tremble → épinette blanche/sapin → thuya (Kneeshaw et Bergeron, 1998). Plus d'information sur la FERLD (objectifs d'exploitation, topographie, dépôts de surface, bassins versants, structure d'âge, groupes d'essences, faune) est disponible dans GREF-I (1999).

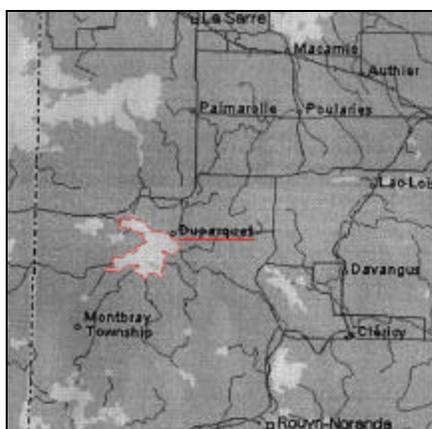


Figure 3.1 Localisation du lac Duparquet, Abitibi, Québec (d'après Microsoft).

Il sera aussi utile de bien connaître les caractéristiques des deux espèces d'arbres qui seront plus spécialement considérées dans cette étude. L'épinette blanche (*Picea glauca* [Moench] Voss) est un conifère tolérant à l'ombre (mais vigoureux à la lumière), résistant au vent, qui pousse par graine sur podzol ou alluvions drainées. Son âge peut dépasser 200 ans (quelquefois 500). Le tronc peut atteindre 55 m (mais environ 30 m en forêt boréale), avec un diamètre de 60 cm (maximum de 120 cm). Sa cime est dense et de forme obtuse (conique). Malgré ce qu'on pourrait penser, la surface foliaire de l'arbre est comparable à celle d'un décidu de même taille, parce que le nombre de feuilles (aiguilles) est beaucoup plus grand (Pielou, 1988). L'utilisation de cette épinette est massive pour la pâte à papier, le sciage et le bois d'œuvre. Elle a fait l'objet de plantations partout au Canada depuis longtemps. C'est justement au Québec, à Grand'Mère, qu'elle fut probablement employée ainsi pour la première fois en 1907 (Sutton, 1973).

Le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx.), souvent appelé *tremble*, est un feuillu intolérant à l'ombre, qui pousse vite après feu ou coupe (densité de 10 000/ha à 10 ans), souvent par drageonnement, sur sol limoneux, glaiseux ou même rocailleux et, atteint 20 à 25 m de haut et un diamètre de 40 à 50 cm (Harlow et Harrar, 1968). En situation de compétition, son long tronc cylindrique à faible défilement sera libre, avec une cime courte et arrondie. Il est reconnu que le peuplier faux-tremble améliore la qualité d'une station (quantité d'eau et diversité biologique végétale et animale accrue) et que, si son indice foliaire diminue dès 30 ans, sa surface terrière, elle, ne décline qu'après 80 ans, son âge limite habituel (Jobidon, 1995). Cet arbre est souvent considéré comme le parent pauvre de l'exploitation forestière. Pourtant, depuis déjà de nombreuses années, on a constaté une augmentation de sa transformation pour le papier et les matériaux de construction, dont les panneaux de grandes particules orientées (Graham *et al.*, 1963). D'autres essences qu'on retrouve souvent mêlées à ces deux espèces sont le sapin baumier, un conifère de forme conique symétrique, l'épinette noire d'environ 15 à 20 m de haut à la cime étroite et, le bouleau blanc, un décidu pouvant atteindre 25 m, à cime ovale, claire et étroite (Hosie, 1978).

3.2 Les données de terrain et cartographiques

Selon Bergeron *et al.* (1983), la zone étudiée fait plus précisément partie de la région écologique des Basses-collines d'Hébécourt (*voir* fig. 3.2 et 3.4). Les données nécessaires et disponibles à la présente recherche sont de cinq ordres (*voir* en fig. 3.3 une carte pour un aperçu global) :

- données cartographiques de la Base nationale de données topographiques (BNDT) au 1 : 50 000 en référence spatiale UTM – datum NAD 83 – zone 17 – sphéroïde de GRS80 (non daté) : topographie et dépôts de surface;
- carte éco-forestière de l'inventaire décennal II du MRNQ au 1 : 20 000 dans la même référence spatiale (fin des années 1980) : types de peuplement et classes de hauteur, de densité, d'âge et d'essence;
- photos numériques noir et blanc orthorectifiées dans la même référence spatiale et images vidéo de résolution 0,5 m prises par avion en septembre 1997;
- fichiers de positionnement GPS de la campagne de sondage d'août 1999 et de post-traitement avec le logiciel PC-GPS;
- inventaires sur le terrain faits en 1998 et 1999 : études détaillées d'arbre (environ 110), placettes-échantillons (42), DHP et essences d'arbre (environ 1 750).

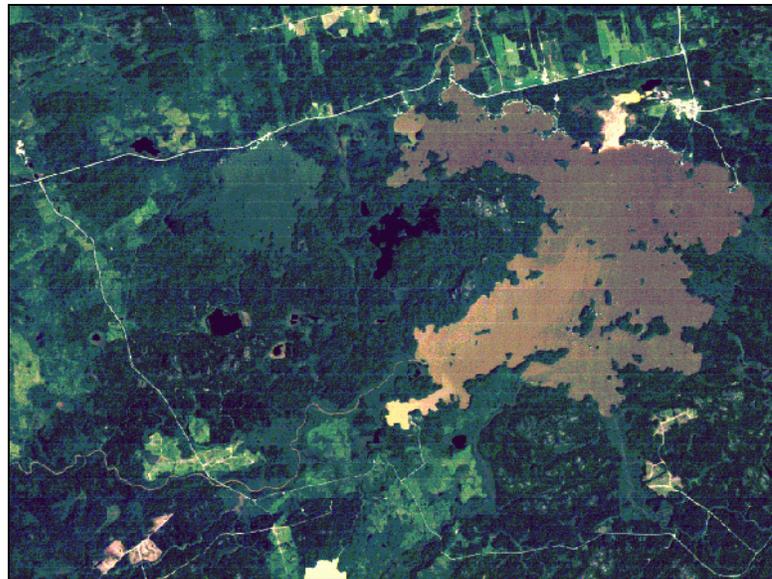


Figure 3.2 Image TM de la zone forestière étudiée autour du lac Duparquet (source : CCT).

3.3 Les données d'altimétrie laser

L'acquisition des points laser en x, y, z s'est faite lors d'un survol par avion en juin 1998. Trois passages à environ 700 m d'altitude furent effectués, un pour les échos de sol et deux pour les échos de végétation (environ 8 km² de surface échantillonnée au total). Un maximum de 20 degrés sous l'avion (de chaque côté) a été enregistré par le système à balayage. La référence 28 du tableau 3.1 donne les autres caractéristiques de ces données. Pour plus d'homogénéité, une région optimale rectangulaire appelée *Survol laser (Zone A)* mais bordée par la berge du lac a été délimitée (cette zone est cartographiée à la figure 3.5). Des données fiables existent pour ce territoire : pour les points laser (exactitude horizontale absolue : 70 cm; verticale : 15 cm) et pour les données de terrain (environ 1 à 3 m d'exactitude positionnelle). Une ambiguïté de positionnement pour quelques arbres et placettes a été résolue lors d'une prise de données supplémentaire (juin 2000).

Outre le matériel nécessaire à l'acquisition de données proprement dite et leur préparation, les ressources planifiées pour la complétion du projet sont surtout informatiques, soit la disponibilité d'un ordinateur personnel assez puissant et de logiciels de statistiques (Excel, Access, SPSS) et de géomatique (MapInfo, ER Mapper, Vertical Mapper ou VM). Pour fins de traitement, les données cartographiques ont été harmonisées au format de fichier TAB (MapInfo). Le calendrier du projet, outre l'acquisition des données déjà faite au préalable, s'est échelonné sur l'année 2000.

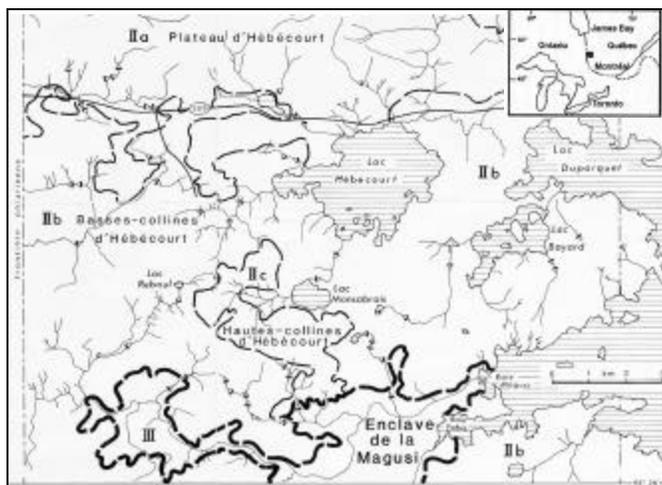


Figure 3.4 Régions écologiques aux environs du lac Duparquet (source: Bergeron *et al.*, 1983).

CHAPITRE IV

LA MÉTHODOLOGIE

Après avoir analysé les besoins en fonction des objectifs recherchés, il sera possible d'expliquer chaque phase de traitement dans le détail, étape par étape.

4.1 Choix des méthodes en fonction des résultats attendus

L'obtention d'un résultat final satisfaisant une visée opérationnelle, soit la prédiction du volume ligneux d'un territoire de forêt boréale mixte par analyse d'un signal laser aéroporté, nécessite de nombreuses étapes, plusieurs desquelles entraîneront des prises de décision ayant un effet significatif sur la suite du déroulement. Entre autres résultats découlant de l'application pas à pas de méthodes choisies (dans celles décrites à la section 4.2) et nécessaires à une analyse plus poussée de la technique du LIDAR selon les objectifs visés, il y a :

- *une carte de la zone d'étude stratifiée par facteurs écologiques (densité, hauteur, groupe d'essences), qui permettra alors de stratifier les volumes de terrain et laser;*
- *une cartographie du modèle numérique de terrain de la zone, sur lequel reposent certains calculs subséquents basés sur la hauteur prédite des arbres;*
- *un tableau sommaire des volumes obtenus sur le terrain (marchand brut, de canopée et au sol théorique), par placette-échantillon et par essence, base de comparaison essentielle considérée comme «vérité-terrain»;*
- *un tableau sommaire des contenances déduites de l'altimétrie laser (brute, interpolée de deux façons différentes, seuillée deux fois, par rang centile, par grille et géométrique), par placette-échantillon, afin de pouvoir les comparer à la «vérité-terrain»; dans le cas des mesures laser, on parle de «contenance» plutôt que de*

volume puisque un seul retour de signal laser est conservé par impulsion, ce qui ne permet pas de prédire l'architecture exacte sous la canopée et donc le volume.

- *un tableau sommaire des volumes déduits de la cartographie et du terrain et prédits par l'altimétrie laser*, par strate forestière, pour apprécier l'effet de l'extension spatiale;

- *des tests statistiques de l'adéquation des volumes déduits de l'altimétrie laser aux volumes obtenus sur le terrain*, par placette-échantillon, par essence et par strate forestière, qui, accompagnés de leurs graphiques respectifs, permettront de juger de la pertinence de chaque méthode à l'essai;

- *une cartographie 2D ou 2D $\frac{1}{2}$ du volume ligneux prédit dans la zone d'étude*, pour montrer les possibilités d'extension spatiale de ces techniques.

Certains de ces résultats, et d'autres moins importants, sont en somme des sous-produits de l'application des méthodes proposées, qui sont eux-mêmes nécessaires à l'obtention du résultat final. En conséquence, l'analyse des résultats intermédiaires (et de leurs résidus statistiques) devrait entraîner le choix d'une des méthodes de déduction du volume par altimétrie laser, qui soit la plus près de la réalité de terrain tout en conservant des qualités statistiques quant à l'exactitude, l'erreur, la précision, la variabilité et la force des hypothèses (Scherrer, 1984). Idéalement, la formule retenue devrait donner directement des volumes marchands bruts interprétables par les intervenants du milieu forestier.

Une comparaison avec certains tests effectués ailleurs permettra par la suite de dégager des tendances indépendantes de la région d'étude. Dans l'éventualité d'une solution positive du problème posé, un mode d'emploi opérationnel pourra être suggéré. Dans le cas contraire, des recommandations quant au perfectionnement de ces systèmes devront être mises de l'avant.

4.2 Les étapes de traitement

Cinq phases divisées en diverses étapes et sous-étapes sont identifiées pour la méthodologie. Les paramètres dans lesquels opèrent les calculs de volume marchand brut «terrain» ne seront pas explicités plus avant puisque la méthode utilisée est essentiellement celle prescrite par le ministère des Ressources naturelles du Québec (MRNQ), méthode qui a été mentionnée plus haut (paragraphe 1.1.3.1):

4.2.1 Acquisition des données

Cette phase déjà effectuée dans les années précédentes (1997 à 1999) permet d'accumuler les données nécessaires (survol, inventaires) pour mener à bien l'expérimentation.

4.2.1.1 Survol du LIDAR et pré-traitement commercial

À cette étape initiale, il s'agit en l'occurrence de faire voler un avion équipé d'un LIDAR ALTM 1020 de la compagnie Optech (fig. 4.1) et de l'appareillage annexe d'enregistrement et de positionnement (contrat à Lasermap, de Boisbriand, Québec). L'intensité d'échantillonnage visée fit en sorte de rendre nécessaire trois survols (deux pour la végétation, un pour le sol). Des logiciels des deux compagnies ont permis la validation et le calcul, la réconciliation des bandes de vol puis la séparation et le formatage des points laser (environ 3 millions). Un survol vidéo a été réalisé en 1997 sur la même zone, permettant d'obtenir plus d'une centaine de vues de 300 m par 350 m (vert – rouge – proche infrarouge).

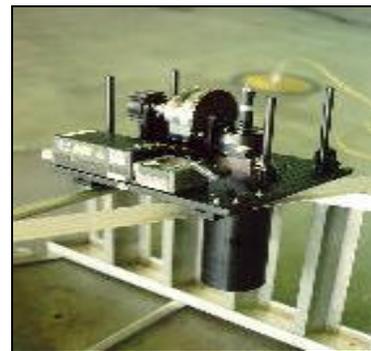


Figure 4.1 Photo du LIDAR Optech (Anon.,2000).

4.2.1.2 Technique de localisation sur le terrain par GPS

Dans cette étape, les sondeurs s'assurent par des tests de positionnement de la qualité de réception des appareils GPS à 12 canaux (terrain : Corvallis MC-GPS 2.5 et base fixe : Corvallis ALTO G12) en tenant compte des données de corrections du MRNQ. L'utilisation de la technique différentielle avec ces appareils en particulier permet une exactitude positionnelle d'environ 5 m sous couvert forestier.

4.2.1.3 Inventaire aléatoire stratifié sur le terrain par placettes carrées

Il s'agit ici de décrire écologiquement une cinquantaine de placettes de 20 m par 20 m réparties à divers endroits de la région d'étude (dans plusieurs strates écologiques) et contenant des arbres parmi les deux essences étudiées (idéalement monospécifiques) :

- choix des placettes à l'aide de la boussole et d'une carte, puis identification (avec étiquette), délimitation (avec topofil) et positionnement (avec GPS);
- mesures pour les arbres de DHP plus grand que 9 cm (DHP à $\pm 0,5$ cm, espèce, santé);
- données écologiques par placette (topographie, dépôt, composition, densité, hauteur).

4.2.1.4 Études d'arbre individuelles sur le terrain

Ces études consistent à marquer un nombre suffisant d'arbres représentatifs du terrain par essence: peuplier faux-tremble (PET) et épinette blanche (EPB) et, à les mesurer précisément (à l'aide d'un compas forestier pour les DHP, d'un ruban pour les rayons de couronne pris à 4 angles droits et d'un hypsomètre à angle pour les 2 mesures de hauteur par arbre, dont on fera la moyenne). Ces deux essences sont ciblées car elles se retrouvent en plus grande quantité dans la zone que les pin gris, peuplier baumier, épinette noire, mélèze laricin, sapin baumier, bouleau blanc, etc. et aussi, à cause de leur intérêt économique et écologique. De plus, on souhaite comparer un feuillu et un conifère (*voir* app. A pour le protocole de terrain détaillé).

4.2.2 Préparation et contrôle des données

Cette phase consiste à prendre connaissance de toutes les données et métadonnées disponibles concernant la région d'étude et d'en faire la sélection, la documentation, la validation (contrôle de qualité sur la prise de données) et le classement afin d'obtenir une configuration opérationnelle (entre autres, par les calculs de géoréférence finale).

4.2.3 Pré-traitement des données

Pendant cette phase, on effectue des calculs ou des opérations annexes à la détermination de la volumétrie mais qui seront nécessaires à cette dernière.

4.2.3.1 Élaboration de modèles allométriques avec les données de terrain

Il s'agit ici de déterminer les paramètres de deux modèles documentés dans la littérature comme crédibles. D'une part, on a un modèle qui permet d'obtenir la hauteur totale d'un arbre à partir de son DHP (Perron, 1985), tel que mentionné au paragraphe 1.1.3.1. D'autre part, il y a un modèle reliant le diamètre de la couronne à ce même DHP (O'Brien *et al.*, 1995). Ces équations de régression sont calculées par essence (PET et EPB) à partir des études d'arbre évoquées plus haut (par. 4.2.1.4). Puis les modèles sont appliqués pour déterminer la hauteur ou le diamètre de couronne, selon le cas. Pour les autres essences feuillus, les modèles «PET» sont utilisés et, pour les autres conifères, les modèles «EPB».

4.2.3.2 Élaboration de modèles avec les données du LIDAR

Pendant cette étape, une vérification du meilleur modèle numérique de terrain possible pour le sol est faite. La technique appelée *natural neighbour* permet une approche

par objet selon les diagrammes de Voronoï, sans dépassement des points originaux, artefacts majeurs ou dégradation en zone clairsemée (Gold et Roos, 1994). Les options de calcul par pente (plutôt que par valeur), de poids 2 et tendance centrale 1, de *forward stepping* et d'adoucissement «hermitien» sans dépassement ajoutent encore un plus grand réalisme. C'est donc cette approche qui est utilisée systématiquement pour toutes les interpolations, sauf indication contraire. Puis les secteurs correspondant aux placettes-échantillons sont extraits de l'ensemble des points laser de végétation bruts et aussi du modèle numérique de terrain :

- extraction des points de végétation d'un secteur, appelé *placette élargie* (120 m par 120 m de côté centrés sur la vraie placette) afin d'éviter les effets de bordure des algorithmes et, filtrage des 2 premiers mètres au sol (pour éliminer les arbustes et les replis du sol);
- modèle numérique de terrain fait à partir de tous les points laser au sol en prenant la valeur minimum dans une surface de 0,5 m de côté.

4.2.3.3 Autres traitements

Il s'agit ici de préparer diverses données et statistiques (sommés, moyennes, écarts-types, densités, auto-corrélation, fractales...) à partir d'autres données disponibles, soit les données d'inventaire du MRNQ pour une classification écologique, les données vidéo pour une meilleure détermination des essences forestières et les données de LIDAR et terrain pour une bonne connaissance intrinsèque (voir entre autres Goodchild, 1986 et Pachepsky *et al.*, 1997):

- stratification selon les inventaires du MRNQ : à partir du feuillet *Forêt*, on isole les polygones qui tombent dans la zone *Survol laser* (une petite surface au sud-ouest a été ignorée puisque non inventoriée sur le terrain) et, on établit des strates à partir du type de peuplement (feuillu, mixte) et des classes de densité et de hauteur; puis on les groupe en s'assurant que les placettes sont bien réparties à travers les strates finales.

4.2.4 Traitement des données

Cette phase consiste à faire les calculs quantitatifs nécessaires pour être en mesure de comparer, par hectare, les données de terrain et du LIDAR et de déceler de possibles facteurs externes. En général, les chiffres par placette ont été obtenus par les commandes *Region info* de VM ou *Info, Boundary select* et *Calculate statistics* de MapInfo, selon le cas.

4.2.4.1 Calcul des volumes de tiges et de couronnes sur le terrain par essence par placette

Il s'agit dans cette étape d'appliquer les équations de tarif de cubage par essence recommandées par le MRNQ. Par ailleurs, on estimera le volume de la couronne d'un arbre «déployé» dans l'espace, selon la forme pour cette essence. Enfin, ces derniers calculs sont «étirés» jusqu'au sol avec un cylindre. Dans tous ces cas, la sommation des tiges individuelles donne un total par placette.

- Volume marchand brut (VMB) : pour chaque tige présente, selon son essence, une équation de régression est appliquée, reliant le DHP mesuré sur le terrain et la hauteur déduite par un modèle (*par.* 4.2.3.1) au volume marchand brut. La notion de *volume ligneux total*, qui donne une quantité environ 10 % plus grande, n'a pas été exploitée (*voir* tabl. 5.1 pour un exemple). Mais un volume limité à +15 cm de DHP a été essayé (pour éliminer les petits arbres qui risquent de ne pas être vus par le laser) :

$$VMB_p = \sum_{i=1}^n VMB_i$$

VMB_p : volume marchand brut d'une placette

VMB_i : volume marchand brut d'un arbre (selon les équations de l'art. 1.1.1)

n: l'ensemble des arbres de la placette de DHP > 9 ou 15 cm, selon le cas.

- Volume de canopée théorique : la situation des calculs volumétriques se complique du fait que différents types de volume sont possibles. En effet, le volume marchand (ou ligneux) ne considère l'arbre que comme un tas de bois empilé, sans sa distribution spatiale. Cependant, si on modélise cet arbre comme un volume pleinement déployé dans l'espace, on conçoit que le résultat soit tout autre. On peut

utiliser une forme conique (à parabolique) ou mi-ovale selon l'essence. En effet, la forme d'une espèce de conifère comme l'épinette blanche est qualifiée d'«excurrente» (c'est-à-dire apicale) tandis que le tremble serait plutôt décurrent (à couronne bombée). De plus, EPB a 60 % de sa hauteur en couronne tandis que PET n'en a que 40 %. À noter que ces calculs ne tiennent pas compte de l'interpénétration des couronnes et vont donc surestimer le volume par rapport au LIDAR. Le volume théorique d'EPB devient donc :

$$VT_i = HC_i * DC_i^2 * \pi/10;$$

et celui de PET sera :

$$VT_i = HC_i * DC_i^2 * \pi/6$$

$$VT_p = \sum_{i=1}^n VT_i$$

VT_p : volume de canopée théorique d'une placette

VT_i : volume de canopée théorique d'un arbre

HC_i : hauteur de la couronne de l'arbre

H_i : hauteur totale de l'arbre

DC_i : diamètre de la couronne de l'arbre.

- Volume au sol théorique : il s'agit simplement de prolonger la forme solide précédente jusqu'au sol en ajoutant le volume d'un cylindre de diamètre *couronne* et de hauteur *arbre (H_i) – couronne* au calcul précédent : $VT_i + (H_i - HC_i) * (DC_i / 2)^2 * \pi$.

- Autres calculs de terrain : le volume obtenu selon Huang et Titus (1994) a été ajouté pour comparaison tandis que le pourcentage de peuplier faux-tremble est basé sur un rapport des volumes et, la surface terrière a été calculée à partir des DHP.

4.2.4.2 Calcul de la contenance selon le signal laser par placette

La contenance se définit ici comme le volume contenu entre une enveloppe supérieure, le haut de la canopée, et une surface de base, la topographie du terrain. Deux grandes catégories de mesures ont été testées (distance égale / distance variable). D'une part, il s'agit de faire simplement la moyenne de la hauteur de tous les points laser de végétation et, de plus, certaines méthodes probabilistes ont été employées. Dans ces techniques, le volume est matérialisé dans un cube de 400 m² en x, y. D'autre part, on ajoute aux calculs un

facteur de plus, soit la notion de distance variable entre les points bruts voisins, en utilisant des méthodes d'interpolation. Un modèle géométrique fut aussi expérimenté. Dans ces dernier cas de figure, le volume est plutôt inhérent à la technique de calcul utilisée. À noter que pour toutes les techniques, on ne passe de la placette élargie à la vrai placette que lors de l'interrogation finale, pour minimiser les effets de bordure.

- Contenance selon la hauteur moyenne arithmétique ou brute: la commande *Point inspection* de VM permet d'obtenir l'élévation du sol du MNT sous chaque point de végétation et la hauteur est obtenue par la différence des deux élévations :

$$CBp = \left[\sum_{i=1}^n (AC_i - AS_i) / n \right] * Sp$$

CBp : contenance brute dans une placette
 AC_i : altitude de la canopée au point i
 AS_i : altitude du sol au même endroit que AC_i
 n : nombre de mesures d'altitude dans la placette
 Sp : superficie de la placette.

- Contenance fixée par une grille de 4 m x 4 m (similaire à la méthode expliquée dans Naesset, 1997a) : à partir des hauteurs brutes, on trouve les points maximum dans la grille avec *Point aggregation* de VM, option *Square cell*. On pondère ces 36 hauteurs par le nombre de points dans chaque carreau (on a $c = 6 \times 6$ hauteurs parce que VM ne commence pas la grille exactement au coin) :

$$CGp = \left[\sum_{c=1}^{36} (N_c * HMAX_c) / n \right] * Sp$$

CGp : contenance par grille pour une placette
 N_c : nombre de hauteurs mesurées dans une cellule de 4 m x 4 m
 HMAX_c : hauteur maximale dans une cellule
 n : nombre de hauteurs mesurées dans la placette
 Sp : superficie de la placette.

- Contenance selon un rang centile : à partir des hauteurs brutes, on trouve la hauteur optimale de la placette basée sur un rang centile de tous les points à différentes hauteurs, à savoir le 85^e centile ou rang supérieur le plus près (dans Excel), une technique que Magnussen *et al.* (1999) avaient éprouvée comme moyen de réduire le bruit :

CCp = H₈₅ * Sp
 CCp : contenance selon le rang centile pour une placette
 H₈₅ : hauteur correspondant au 85^e rang centile
 Sp : superficie de la placette.

- Contenance sous le signal interpolé : tel que spécifié au paragraphe 4.2.3.2, l'interpolation *natural neighbour* a été choisie, à 0,5 m de résolution, par valeur maximum. Cette méthode sera appelée *interpolation de base* à continuation. Pour fins de comparaison, une interpolation TIN (*triangulated irregular network*) de 5^e ordre, à pixel de 0,5 m, avec triangles limités à 10 m, a aussi été calculée. Dans les deux cas, le volume de végétation est obtenu par différence avec le MNT produit auparavant :

$$CIp = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (AC_{ij} - AS_{ij})$$

CIp : contenance interpolée dans une placette

AC_{ij} : altitude de la canopée au point ij

AS_{ij} : altitude du sol au même endroit que AC_{ij}

m : nombre de colonnes dans la matrice de 50 cm

n : nombre de lignes dans la matrice de 50 cm.

- Contenance sous le signal interpolé seuillé à 10 mètres ou seuillé à la moyenne de hauteur : à partir de la valeur *natural neighbour* précédente, la commande *Grid query* de VM sélectionne les pixels de hauteur plus grande que 10 m ou plus grande que la hauteur moyenne interpolée pour la placette. Ainsi, le calcul est fait de la même manière que précédemment mais ne conserve que les valeurs élevées de hauteur. Les valeurs plus basses pourraient correspondre à de petits arbres non inventoriés sur le terrain en raison de leur petit DHP.

- Contenance selon un modèle géométrique par essence : puisque la hauteur laser est supposée sous-estimer la hauteur réelle d'un arbre parce que le signal ne tombe pas systématiquement sur le sommet des couronnes, nous avons «construit» un volume d'arbre théorique et déduit sa hauteur totale probable à partir des points laser bruts. Dans un premier temps, on a calculé le volume d'un arbre idéalisé, de hauteur maximale (selon le plus haut arbre étudié) et de largeur moyenne selon les études d'arbre (puisque'on n'a pas décodé cette information du LIDAR). Puis on a trouvé la hauteur probable à 50 % du volume que devrait avoir un arbre en particulier, selon la hauteur où est tombé le point laser, en supposant qu'il y ait 100 % de chance que la hauteur réelle soit supérieure à la brute et 0 % qu'elle soit supérieure à la hauteur maximale. Le choix du modèle (voir tabl. 5.2 pour les équations) est déterminé

par l'espèce couvrant 60 % du volume de la placette, PET ou EPB (en cas de forte mixité, la moyenne des deux modèles a été prise). Puis, les hauteurs obtenues sont réintroduites dans l'interpolation de type *natural neighbour* avec les mêmes options que pour la contenance sous le signal interpolé de base expliquée plus haut.

4.2.4.3 Impact statistique des facteurs externes

Cette étape permettra par la suite d'apprécier les facteurs biotiques, abiotiques ou techniques de variabilité. Pour chaque facteur, il faut trouver sa valeur pour chaque placette :

- le dépôt de surface pour sa valeur dans le feuillet *Depot*, le drainage selon l'allure du terrain du feuillet *Hypso*, la pente et l'azimut tels que dérivés du MNT par les commandes *Create slope and aspect* et *Region inspection* de VM, l'âge, de *Foret*;
- la densité d'impulsions laser réfléchies est fondée sur le rapport entre le nombre de points de végétation totaux tombés dans une placette et 400 (soit 400 m² et une densité théorique d'un point par m²), le pourcentage de couverture des arbres est obtenu en divisant le nombre de pixels interpolés supérieurs à 4 m de hauteur par 1 600 (soit 400 m² et un pixel de 0,5 m) et, le taux de pénétration du signal laser, en divisant le nombre de points au sol par la moitié du nombre de points de végétation total (il y a eu 2 survols pour 1).

4.2.5 Analyse préliminaire des résultats

Si les résultats préliminaires montrent des problèmes, une rétroaction avec la phase précédente sera faite. Puis, à partir des meilleurs modèles trouvés, le passage des valeurs de *contenance* du LIDAR à celles de *volume* prédit pourra être opéré.

4.2.5.1 Classement des modèles pour le volume par placette

Il s'agit dans cette étape d'apprécier chaque paire de mesure terrain-LIDAR (24 combinaisons possibles) pour chacun des regroupements suivants, par l'analyse des corrélations (des analyses factorielles et des régressions multiples seront aussi tentées) : total général par placette; total selon le pourcentage de peuplier faux-tremble; total selon l'essence prédominante à plus de 60 %.

4.2.5.2 Établissement d'un modèle pour le volume par strate

Il s'agit ici d'appliquer le même genre de raisonnement à l'échelle des strates que celui qui a été mis au point pour les placettes. Pour ce qui est des données du LIDAR en particulier, il faut d'abord déterminer le modèle de prédiction le plus adéquat parmi ceux testés pour les placettes. Puis on va appliquer le modèle choisi pour le volume total par strate forestière : à cause du grand volume de données, les opérations se font en quatre sous-zones de 1,9 km de large par 4,25 km de long. D'une part, quatre grilles mutuellement exclusives sur le plan spatial sont créées par la commande *Point aggregation* de VM, option *Square cell* de 20 m de côté, en demandant la création d'un fichier de régions MapInfo. D'autre part, les prédictions selon le modèle choisi sont calculées en quatre parties se chevauchant légèrement (afin de minimiser les effets de bordure). Les mêmes étapes ayant donné lieu au modèle choisi sont appliquées (extraction, interpolation à 0,5 m de résolution, seuillage, etc.). Les quatre résultats sont reportés dans les quatre grilles par la commande *Region inspection*. Puis les quatre grilles sont fusionnées dans MapInfo. On peut alors appliquer à la grille finale l'équation de régression valable pour les placettes de 20 m par 20 m, afin de passer d'une contenance laser à un volume marchand brut prédit.

Pour ce qui est du volume déduit du terrain et de la cartographie, il suffit de calculer la moyenne de volume à l'hectare à partir des placettes tombant dans chaque strate (dans Excel). À noter que l'échantillonnage n'avait pas été conçu pour cette fin, de là un

déséquilibre potentiel dans la représentation de chaque strate. Puis, ces moyennes sont reportées dans la carte des strates, celle dont on a parlé au paragraphe 4.2.3.3. On obtient le lien entre le feuillet des strates et celui de la grille par la commande *Update column* de MapInfo, option *Join (contains)*. Il est alors facile de transférer les volumes laser prédits dans les strates (en veillant à demander une moyenne pondérée par la surface). Le volume total (de terrain ou du LIDAR), par strate, est obtenu en multipliant le volume moyen à l'hectare respectif par la superficie des polygones de la strate.

4.2.5.3 Analyse des facteurs externes

Les facteurs externes retenus pour analyse sont : le dépôt, le drainage, la pente et l'azimut dérivés du LIDAR, l'âge des arbres, leur densité de couverture et, le taux de pénétration du signal laser. Pour les facteurs numériques continus, des régressions multiples ont été tentées. Avec une méthode de travail bien circonscrite, on peut dès lors prendre connaissance des résultats.

CHAPITRE V

LES RÉSULTATS

Dans ce chapitre, on examinera tous les résultats obtenus, plus ou moins en détail selon leur intérêt et, on tentera de les placer dans le contexte global de cette recherche, sans faire référence pour l'instant aux résultats obtenus en altimétrie par d'autres chercheurs.

5.1 Inventaire sur le terrain

5.1.1 Le contrôle des données traitées

Dans l'ensemble, et malgré la présence du brouillage militaire au moment de l'acquisition, les mesures positionnelles par GPS se sont révélées adéquates, à cause de l'emploi de la technique de correction différentielle (*voir* par. 4.2.1.2). Par exemple, des lectures répétées au point de référence DGPS affichaient une variation d'environ 1 m de la «vraie» position établie par le MRNQ, soit une solution horizontale ou verticale d'environ 0,37 m *RMS*, en vertu d'un «DOP» adéquat. Cependant, les mesures ultérieures de juin 2000 (alors que le signal avait été débrouillé) ont montré que l'exactitude positionnelle des mesures de 1999 en forêt pouvait varier de 1 à 14 m, mais en général de 3 m, ce qui, dans le cas des placettes, indiquerait un facteur d'erreur contribué inférieur à 10 % : $3 / \sqrt{(20\text{m}^2 * 20\text{m}^2)}$. Les erreurs importantes sont attribuables à la géométrie défavorable des satellites GPS au moment de l'acquisition. Ces erreurs sont une source de variabilité à l'échelle de la placette (décalage entre l'emplacement des arbres mesurés sur le terrain et la position de la fenêtre correspondante sur les données du LIDAR) et, contribueront donc à diminuer les valeurs de r^2 qui seront calculées pour les modèles de prédiction du volume.

Si on avait voulu faire l'inventaire des volumes d'une région, une cinquantaine de placettes auraient été nécessaires, pour un taux d'échantillonnage recommandé d'environ 1/200 : $50 * 400 \text{ m}^2 / 4 \text{ km}^2$. Ceci étant précisé à titre indicatif, 42 placettes-échantillons ont pu être inventoriées dans notre cas (*voir* par. 4.2.1.3). Mais 4 furent écartées à cause de divers problèmes tels que : mesure GPS douteuse ou milieu inadéquat par rapport aux objectifs. La localisation des 38 placettes restantes ayant servi à tous les calculs subséquents est montrée

sur une carte (*voir* fig. 3.5); seule la moitié droite de la 42 a été comptée, pour cause de proximité avec une autre placette. Pour les études d'arbres, une centaine de mesures par essence aurait été préférable, mais seulement une cinquantaine d'individus purent être étudiés, que ce soit pour le peuplier ou l'épinette (*voir* par. 4.2.1.4). La figure 3.3 indique les lieux d'étude.

5.1.2 Les relations allométriques à partir des données de terrain

Suite aux calculs effectués avec les études d'arbre valides, une relation probante de la hauteur totale d'un arbre en fonction de son DHP a pu être établie par essence (*voir* par. 4.2.3.1). La signification des relations établies à continuation est de 0,001 ou mieux. Par exemple, la figure 5.1 montre la force de la relation pour l'épinette blanche (un r^2 non ajusté de 0,66; ce chiffre correspondant au coefficient de détermination, indique que 66 % de la variabilité de la hauteur est expliquée par le DHP). Une relation similaire a pu être obtenue pour le peuplier mais en éliminant les individus pour lesquels un écart de plus de 2 m entre les deux mesures de hauteur perpendiculaires a été détecté (*voir* fig. 5.2). Notons qu'O'Brien *et al.* (1995) obtinrent des r^2 de plus de 0,8 pour des essences tropicales. Le temps d'inventaire restant ne nous a pas permis de faire plus de mesures de hauteur mais, nous en avons tout de même plus que nécessaire, ce qui nous permet d'aller de l'avant avec ces analyses. D'ailleurs, les relations quadratiques se révèlent meilleures (r^2 supérieur à 0,7 dans les deux cas) et seront utilisées par la suite dans les calculs de volume, comme le prescrit Perron (1985).

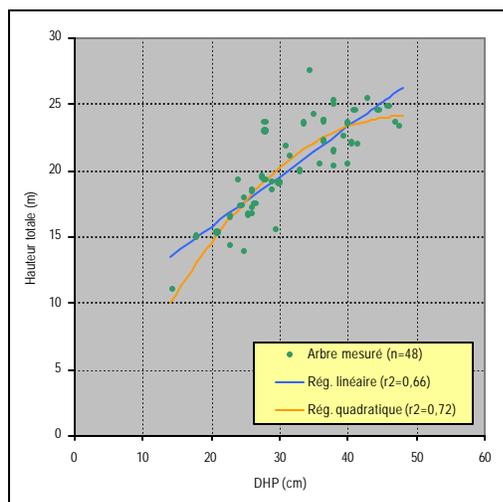


Figure 5.1 Hauteur totale de l'épinette blanche en fonction de son DHP.

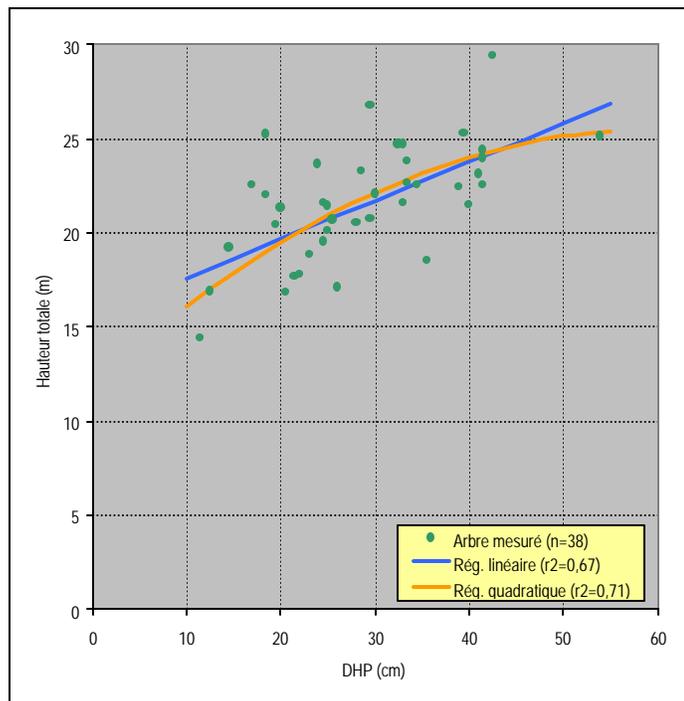


Figure 5.2 Hauteur totale du peuplier faux-tremble en fonction de son DHP.

Quoique d'allure similaire à celle d'un tarif local du MRNQ pour cette zone (Gilbert, 2000), nos courbes donnent une plus grande hauteur, surtout pour les peupliers. Par ailleurs, la dérivation de volumes déployés dans l'espace (par contraste avec le volume marchand «empilé») requerrait l'établissement de relations entre le DHP et le diamètre de couronne individuelle. Des études ont déjà démontré que ces deux mesures sont reliées, car le poids de la couronne d'un arbre doit être supporté par les tissus ligneux de son tronc (Rondeux, 1993). La mesure des diamètres de couronne sur le terrain étant moins sujette à erreur que la hauteur, pratiquement toutes les études d'arbre valides ont été reprises : l'épinette blanche donne un degré d'amplitude de la couronne de 15 et le peuplier, de 21 (voir fig. 5.3 et 5.4). Les relations linéaires obtenues, bien que significatives, sont cependant moins fortes que pour la hauteur (soit un r^2 de 0,63 ou moins). Zarnovican (1982) avait obtenu un r^2 de 0,75 pour le sapin baumier. Mais le choix de modèles plus complexes ne nous semblait pas indiqué. Dawkins (1963) recommande fortement la droite, bien que la forme théorique de la courbe pourrait être sigmoïde dans les DHP extrêmes pour des arbres très jeunes ou très âgés. Dans notre cas, les gaulis ne sont d'ailleurs pas pris en compte.

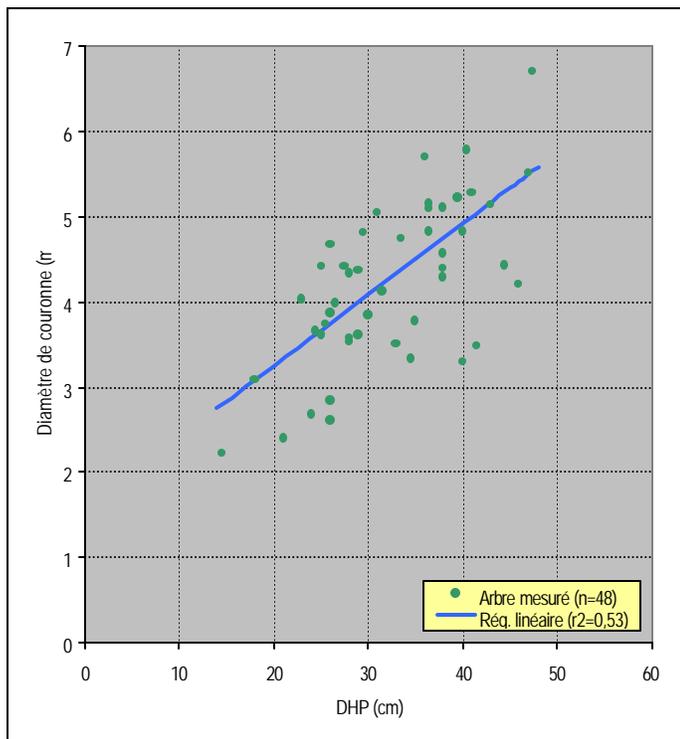


Figure 5.3 Diamètre de couronne de l'épinette blanche en fonction de son DHP.

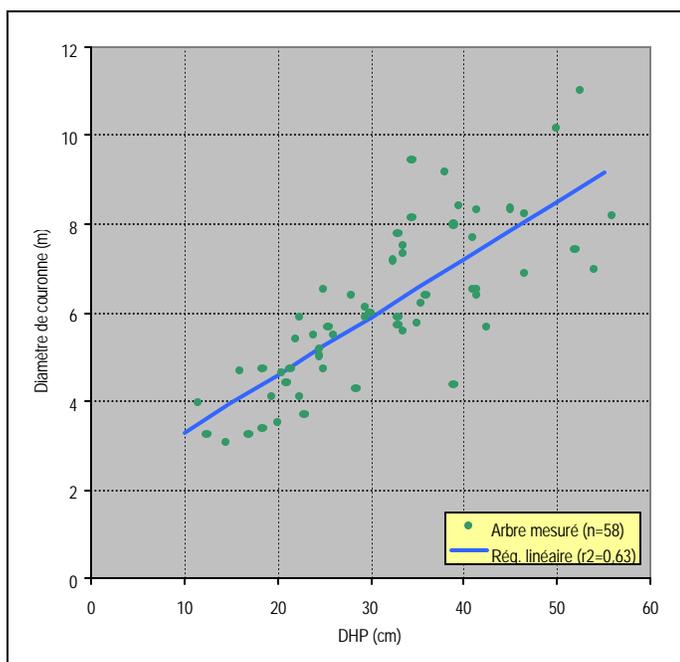


Figure 5.4 Diamètre de couronne du peuplier faux-tremble en fonction de son DHP.

5.1.3 Le volume marchand brut calculé d'après les données de terrain

Le tableau 5.1 donne les mesures dérivées de l'inventaire sur le terrain pour chaque placette de 20 m de côté retenue. Notons que les lignes *Moyenne*, *Minimum*, *Maximum* et *Écart-type* donnent des statistiques par arbre, contrairement aux autres chiffres du tableau qui sont par placette. Une majorité de feuillus vivants, en particulier des peupliers (à 54 % du total en volume), se trouvaient dans ces peuplements, mais aussi beaucoup d'épinettes blanches et en moindre quantité des bouleaux blancs, sapins baumiers, épinettes noires, thuyas occidentaux et frênes noirs. Le DHP moyen a été de 20 cm et la hauteur, de plus de 17 m, quoique les peupliers étaient sensiblement plus grands que les épinettes. En moyenne, 41 arbres de plus de 9 cm de DHP ont été comptés par placette, soit 1 018 tiges/ha ou 1 547 au total. Chaque arbre occupait environ 300 dm³ d'espace marchand (brut sous écorce), pour un volume à l'hectare par placette effectif de plus de 300 m³ (voir par. 4.2.4.1). Pour plus de commodité, tous les résultats volumétriques de terrain et du LIDAR *par placette* seront donnés en m³/ha dans la suite du texte. Une variation importante existe entre placettes puisque l'écart-type est de plus de 100 m³/ha. Le volume conservé dans les tiges de 15 cm ou moins ne représente que 5 % du total. Le diamètre de couronne est supérieur pour le tremble (4,6 m contre 3,2 pour l'épinette). On constatera l'effet notable du déploiement dans l'espace de cette matière végétale en observant le facteur d'environ 400 entre le volume marchand brut et le volume de canopée théorique. Ce dernier est à son tour 6 fois moindre que lorsqu'on l'«étire» jusqu'au sol, ce rapport reflétant l'impact des branches mortes et du vide.

Afin de vérifier cette «vérité-terrain» très importante pour la suite de l'expérience, il semblait approprié de tester les volumes bruts par une autre méthode (Huang et Titus, 1994):

$$V = (1,3 + (p(1^{-e-qSM}) + rC_e + sIQ_e + tST + uDM) * (1 - e^{-vDHP})^{(w + xDHP/DM + yIQ_e)}) * DHP^2$$

SM : surface terrière pour la placette

C_e : composition selon la présence de l'essence (SM_e / SM)

IQ_e : index de qualité uniforme (selon la hauteur moyenne des arbres de DHP = 20 cm)

ST : surface terrière de l'arbre

DM : DHP moyen des arbres

p, q, r, s, t, u, v, w, x, y : coefficients établis selon l'essence (peuplier ou épinette).

On a donc pu comparer les volumes calculés selon cette méthode à ceux obtenus par la méthode du volume marchand brut «de Perron» (voir par. 4.2.4.1). La corrélation entre les deux calculs est de 0,99, ce qui augmente notre confiance à l'égard de la validité des calculs (voir fig. 5.5). De plus, une autre méthode a été appliquée à un sous-ensemble de placettes fortes en épinette blanche, dans laquelle le DHP est mis à une puissance pour obtenir le volume, tel que décrit par Zarnovican (1982). La relation avec le volume «de Perron» s'est également révélée d'apparence linéaire, avec un écart d'environ 50 m³/ha entre les deux calculs. Ces diverses comparaisons permettront donc de relativiser l'exactitude des autres résultats volumétriques à venir plus loin dans l'analyse.

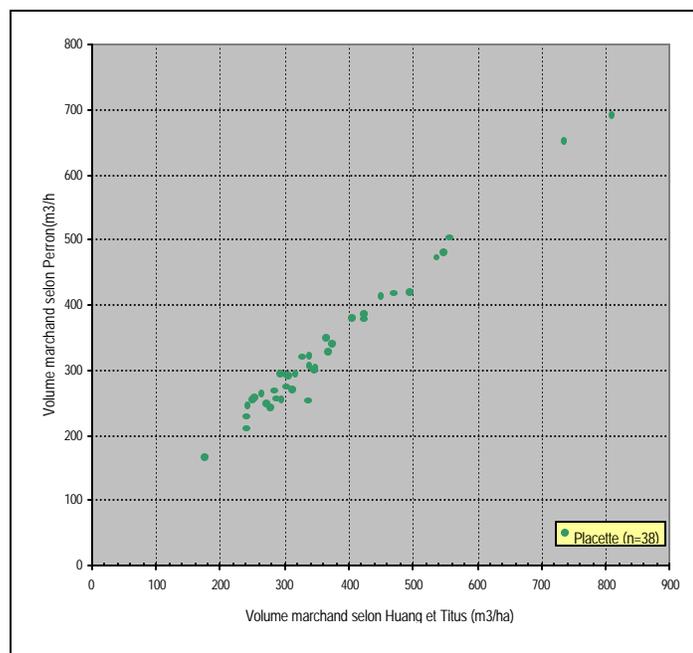


Figure 5.5 Comparaison du volume marchand brut calculé selon deux méthodes.

5.2 Observations initiales sur les points laser au sol

Il faut d'abord préciser que des calculs ($2 \cdot \text{hauteur d'avion} \cdot \tan(\frac{\epsilon}{2})$), où ϵ exprime la divergence du laser en mrad, n'ont pas permis de confirmer la dimension exacte de la tache au sol du laser pour cette expérience ou d'autres tests passés. C'est pourquoi les dimensions publiées dans Baltsavias (1999c) : 25 mrad donnant 19 cm, ont été utilisées. Cette incertitude n'a finalement pas affecté les calculs ultérieurs puisque notre expérience ne requérait pas de

traitements basés sur des points individuels (reconnaissance de formes, etc.). Plus de 400 000 points considérés comme étant des retours du sol étaient disponibles pour tout le *Survol laser* (Zone A) tel que défini en section 3.3, beaucoup moins que pour la végétation (2 000 000). Il pouvait arriver que fort peu de ces points soient tombés à l'intérieur d'une placette donnée. L'altitude moyenne locale de la végétation sera donc plus exacte que celle du sol (*voir* par. 4.2.1.1). Un inconvénient potentiel de la technique d'acquisition est qu'on perd la relation entre les deux retours possibles d'une impulsion donnée (celui de la végétation et celui du sol). Mais la figure C.4 montre l'orientation du sol obtenue à l'aide de Vertical Mapper (pixels de 5 m de côté). On y constate la présence de zones assez homogènes qui contrastent avec d'autres dont l'azimut est très hétérogène. On remarque également que la direction semble perpendiculaire à celle des courbes de niveau cartographiques. La figure C.7 paraît situer sur les replis dénudés et rocheux les endroits de plus grande rugosité au sol (soit la dérivée de la pente du terrain, définie dans Berry, 2000). Les hydrologues utilisent ce type de carte pour déterminer l'infiltration de l'eau. Nous n'avons pu vérifier si du bruit (facteurs externes) était présent dans ce résultat.

La figure C.5 montre un modèle numérique de terrain confectionné à l'aide des points laser de sol de toute la zone A (*voir* par. 4.2.3.2). En plus de la perspective, les couleurs (froides à chaudes) permettent d'exprimer les élévations croissantes (de 228 à 328 m), pour une dénivellation d'environ 100 m sur ce territoire de collines et d'eau. On a pu vérifier de façon statistique qu'un des MNT obtenus (20 m de résolution) suivait de près les élévations affichées sur un feuillet cartographique d'hypsographie de la BNDT. Pour cela, on a transformé ce dernier du mode vectoriel au mode matriciel à la même résolution que le MNT du LIDAR puis, on a comparé les 4 604 paires de valeurs de même localisation ($r^2 = 0,94$; écart de 4 m en z). Une partie des écarts peut être expliquée par une certaine erreur dans le positionnement x, y des courbes du feuillet cartographique. Une différence constante de 35 à 40 m existe entre les deux mesures en z. La cause en est que la hauteur géodésique de référence n'est pas la même pour les feuillets cartographiques que pour le survol. Des cartes de confluence (c'est-à-dire le chemin de l'eau de pluie en surface) peuvent être dérivées de cette information et servir à l'analyse détaillée de l'érosion locale. On pourra

aussi s'en servir pour la représentation photoréaliste d'un endroit à des fins de planification visuelle d'un projet de développement industriel, résidentiel ou touristique (voir fig. C.6).

5.3 Observations sur les points de végétation

Environ 2 000 000 de points de végétation au total couvraient la zone A, ce qui a pu être obtenu 1) en faisant deux passes pour le premier retour au moment du survol et, 2) parce que les cinq bandes de 250 m de large nécessaires pour chaque survol se superposaient en partie. À la figure 5.6, la bonne adéquation positionnelle des trois survols entre eux et la ségrégation des hauteurs inférieures (sol) ou supérieures (végétation) à 2 mètres peut être observée par la superposition des couples de points de végétation mesurés par LIDAR et de sol modélisés par un MNT, localisés au même endroit, dans une bande de sol en pente de 70 m de long. L'épaisseur de la ligne de sol peut être due à la surface non lisse du terrain et à une certaine inexactitude du LIDAR tandis que la hauteur de la bande végétale correspond aux variations de la hauteur du couvert arboré. Le vide relatif vers 265 m indique un plan incliné dans le relief. En principe, la différence entre l'enveloppe supérieure du nuage de points de végétation et le niveau moyen du sol constitue la hauteur des arbres, vus sur un terrain plat.

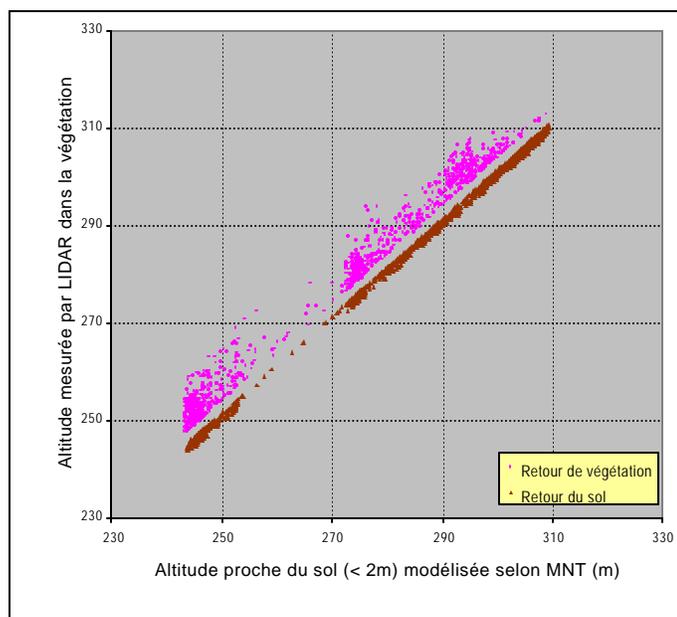


Figure 5.6 Échantillon du signal laser montrant l'altitude de végétation et de sol au même point.

Une autre forme de comparaison de données transformées est possible, cette fois entre le MNT et un modèle numérique de végétation – avant déduction de l’altitude du sol –. Dans ce graphique (fig. 5.7), on voit le profil du terrain pour un secteur arbitraire de 100 m de long. Sur cette section abrupte, la hauteur de végétation moyenne calculée est d’environ 6 m, plus ou moins 4. Mais on détecte ici la possibilité de hauteurs négatives, ce qui constitue donc une raison supplémentaire de filtrer le signal laser sous les 2 m de hauteur. D’autre part, on a joint au graphe un feuillet de courbes de niveau cartographiques (dont on a abaissé la hauteur de 40 m afin d’assurer la comparaison), ce qui montre bien sûr l’impact des trois «résolution» différentes sur le niveau de détail potentiel de chaque couche du SIG.

La figure C.8 a été obtenue en superposant des courbes de niveau générées à partir du MNT à d’autres obtenues à partir du modèle de surface de végétation. On y constate que la densité des points de végétation permettra des modèles plus fins que dans le cas du sol. La vue en perspective du MNS d’une placette et de son voisinage permet une représentation très efficace de la structure du couvert (*voir* fig. 5.8). Dans ce cas précis, on voit que l’avant est moins fourni en arbres que l’arrière-plan.

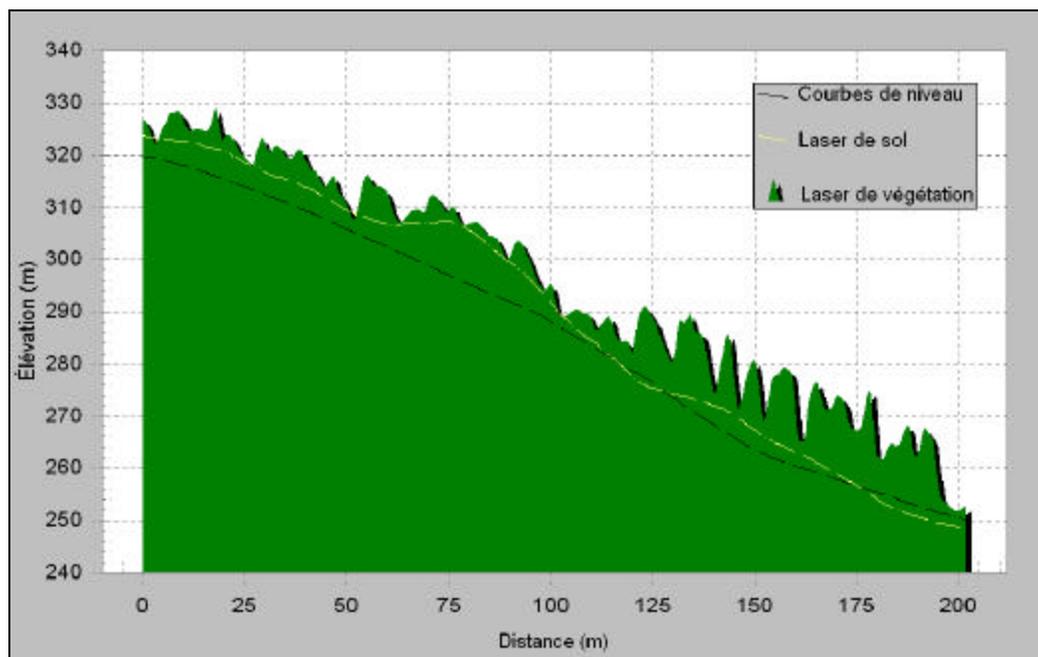


Figure 5.7 Profil topographique dans un secteur en pente de la région d’étude.

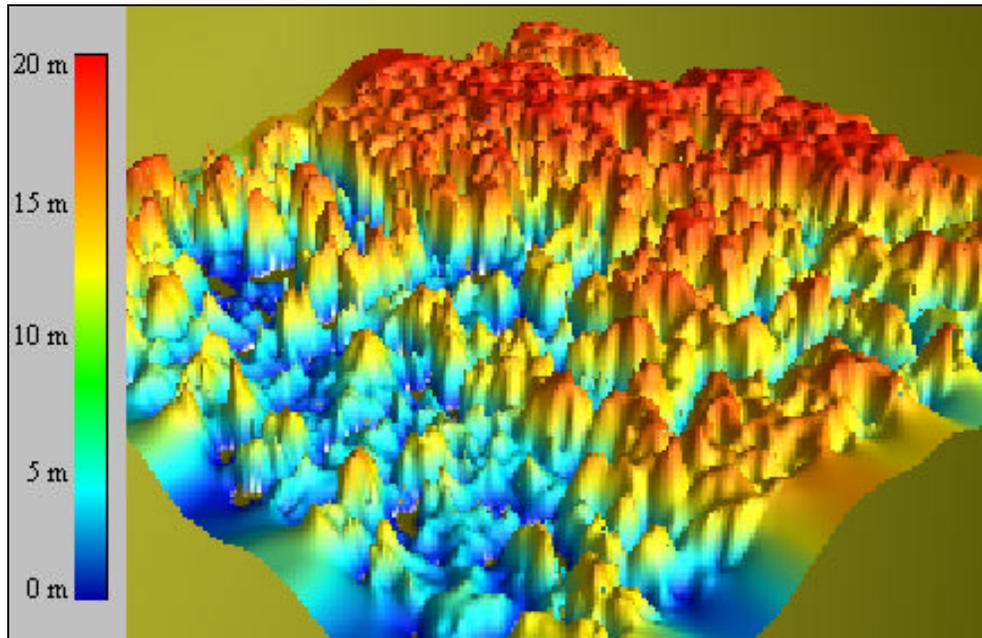


Figure 5.8 Modèle numérique de surface du couvert végétal pour une placette élargie.

La figure C.9 montre d'ailleurs le patron végétal obtenu à l'aide d'un type différent d'interpolation, soit par la technique du TIN. On y distingue bien les artefacts triangulaires. Les quelque 60 mètres d'intervalle en altitude sont bien sûr attribuables en partie au relief du sol et en partie à celui des arbres. En outre, on y voit en haut à droite, en vert, le patron typique des points laser de végétation, en zigzag (écartement entre les lignes de balayage plus grand qu'entre les points d'une ligne). Enfin la figure C.1 illustre ce qui se passe lorsqu'on a soustrait l'altitude du sol de l'élévation totale végétale, c'est-à-dire qu'on a obtenu des hauteurs nettes. On distingue facilement l'architecture arborée dans cette vue oblique.

Le tableau 5.2 donne les résultats chiffrés de tous ces calculs faits sur le signal laser (voir par. 4.2.4.2). On y remarque que la hauteur moyenne est de plus de 14 m, environ 3 m de moins que celle mesurée sur le terrain, ce qui confirme les observations faites par plusieurs chercheurs dans le passé sur la sous-évaluation des hauteurs par le LIDAR. On peut ranger les contenances dans l'ordre croissant de leur moyenne : seuillées à la moyenne et à 10 m, interpolées TIN et *natural neighbour*, puis brutes et brutes seuillées, enfin par grille, géométriques et par rang centile.

Les contenances découlant d'une interpolation semblent plus faibles en général que celles calculées avec des données plus brutes. En outre, le recouvrement arboré prédit est très élevé, plus de 93 % et, le taux de pénétration du signal laser jusqu'au sol varie de 0 à près de 30 %. La pente moyenne estimée du terrain est de 5°, dans un intervalle de 1 à 15. On a aussi effectué un calcul de la pente du couvert végétal étendu à toute la zone A : il s'agit de considérer la surface de hauteur interpolée comme un MNT et donc, de mesurer la pente de chaque pixel de 20 m par 20 m avec VM. Ce calcul donna une moyenne de 6°, dans un intervalle de 0 à 50.

5.4 Comparaison entre les résultats de terrain et du LIDAR

5.4.1 La hauteur des arbres par essence

Puisque la hauteur n'était pas une caractéristique dendrométrique qui avait été mesurée systématiquement dans les placettes (sur le terrain), il a été jugé impossible d'utiliser les études d'arbre afin d'évaluer l'exactitude de l'altimétrie laser sur une base d'arbres individuels. Les causes en sont 1) le petit nombre de données et, 2) l'existence de trop d'impondérables pour ce genre d'analyse rapide (positionnement, endroit le plus près du sommet où tombe le signal laser dans la fronde, etc.). De toute manière, une étude sophistiquée de ce type a déjà été faite par St-Onge (2000). Ce dernier s'appuyait également sur des images multispectrales à 50 cm de résolution et un positionnement de qualité. C'est ainsi qu'une mise en relation a été faite, pour 36 arbres propices, entre la hauteur estimée sur le terrain, d'une part et, la hauteur donnée par le LIDAR au point situé vis-à-vis, d'autre part. Une régression produisit un r^2 de 0,90. On constata aussi que la différence moyenne entre les deux hauteurs était de 1,5 m. C'est donc une source d'erreur significative (environ 10% de la hauteur moyenne des arbres de la zone) dont on devra tenir compte lors de l'analyse des résultats.

Dans notre étude, un autre facteur d'importance plus faible pourrait jouer, et influencer également les comparaisons volumétriques à venir plus bas, à savoir qu'une compensation des volumes de terrain vers le bas serait peut-être nécessaire, puisque une

année de croissance végétale sépare les données de terrain (1999) des données du LIDAR (1998) et aussi, parce que nos modèles semblent surévaluer la hauteur sur le terrain (comme on l'a vu à l'article 5.1.2). Cette correction ne pourra se faire, en l'absence de critères précis.

5.4.2 La distribution de fréquence des données brutes

Une autre façon d'apprécier la nature des données de base en cause est de regarder le comportement des centaines de DHP mesurés sur le terrain (fig. 5.9) et des milliers de hauteurs laser de végétation déduites des survols aériens (fig. 5.10). Un total de 35 placettes ont été combinées pour permettre cette analyse. Les quantités ne sont pas comparables individuellement bien sûr, puisque, dans un cas, on a une mesure par arbre et, dans l'autre, plusieurs. On constate sur ce premier graphique une certaine dissymétrie vers la droite par rapport à la courbe normale pour les données de terrain. Ceci reflète la distribution typique qu'on peut observer en forêt, à savoir beaucoup moins de gros arbres que de petits.

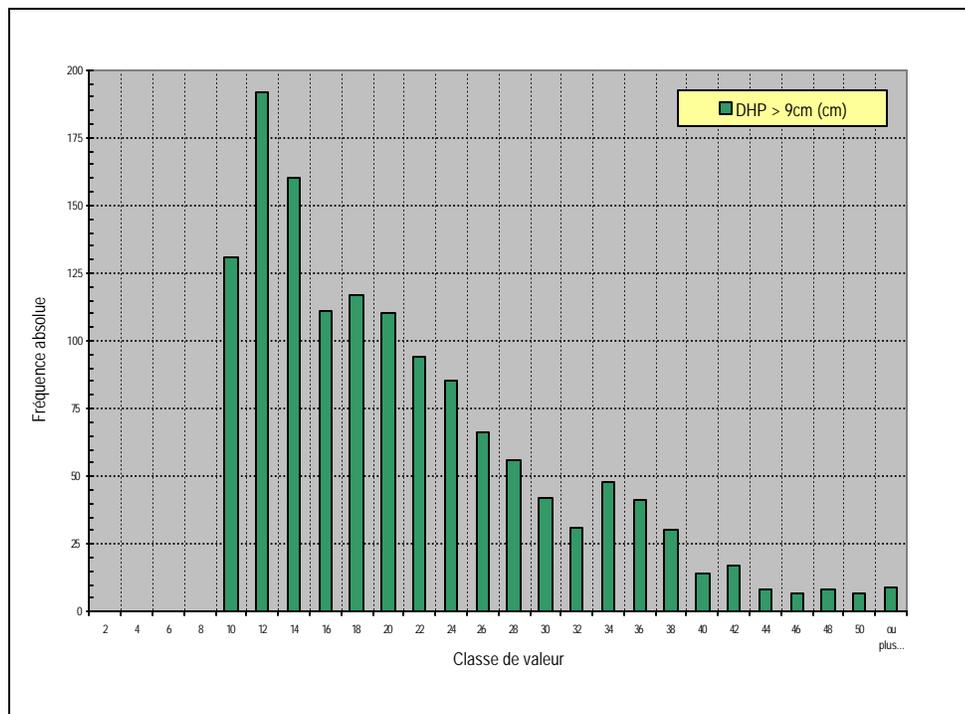


Figure 5.9 Histogramme de fréquence de mesures individuelles du DHP sur le terrain.

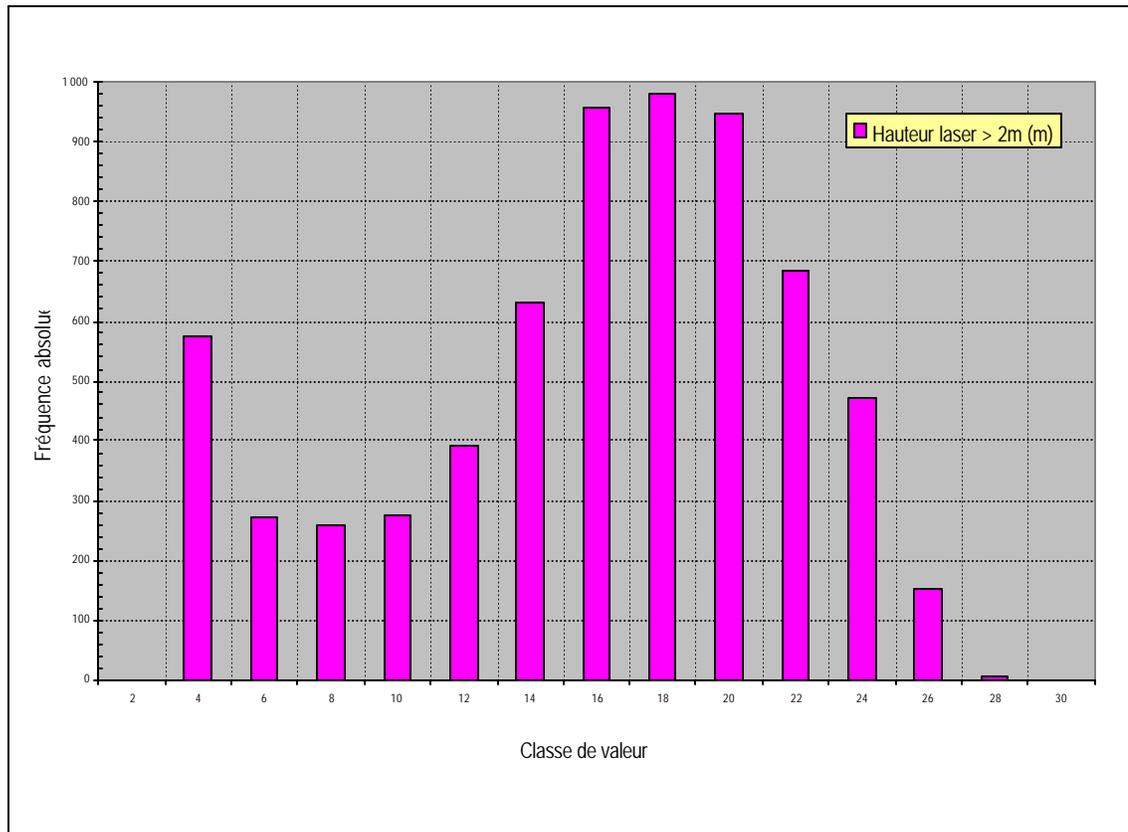


Figure 5.10 Histogramme de fréquence de mesures individuelles de végétation par le LIDAR.

C'est sans doute pourquoi les relations non linéaires se sont révélées les meilleures, notamment les modèles quadratiques. Dans le cas du LIDAR, une concentration vers 2-3 m démontre l'intérêt de supprimer les observations de végétation les plus basses, qui sont probablement des couverts végétaux arbustifs ou même des accidents du relief.

Il est intéressant de voir comment les distributions se comportent lorsqu'on passe à des résultats individuels de nature volumétrique, c'est-à-dire qu'on produit un histogramme de fréquence à partir des calculs du volume de terrain pour chaque arbre et de la contenance laser brute pour chaque point (*voir* fig. 5.11). Dans ce cas, les conteneances ont été pondérées (divisées par 400) afin d'obtenir une échelle comparable aux volumes de terrain. On

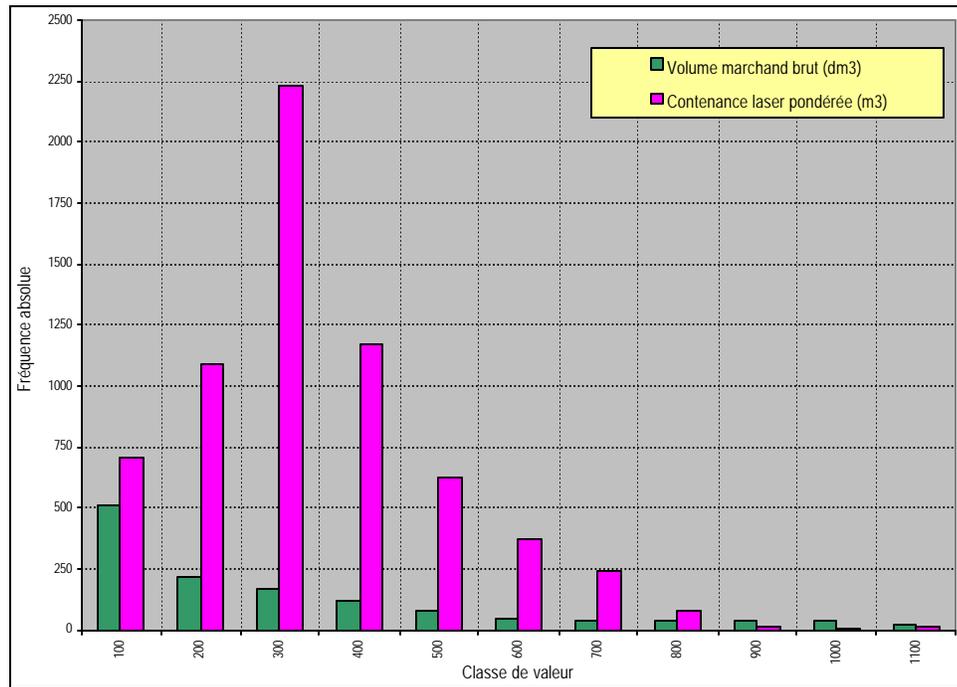


Figure 5.11 Histogramme de fréquence de calculs individuels de volumétrie.

remarque la même tendance à la dissymétrie à droite pour les volumes de terrain que celle déjà constatée plus haut, qui confirme l'opportunité d'une transformation (quadratique ou log).

5.4.3 La comparabilité des données regroupées par placette

On aura remarqué que les contenances laser du tableau 5.2 donnent des nombres beaucoup plus grands que les volumes de terrain, de plusieurs ordres de grandeur en fait (412 fois plus, pour être plus précis). Afin d'assurer une comparabilité plus grande, un facteur de 400 a par la suite été utilisé comme diviseur de toutes les contenances laser (ce qui n'affecte pas en soi les tests statistiques ultérieurs). Ainsi, une contenance laser interpolée moyenne de $342 \text{ m}^3/\text{ha}$ se comparera mieux à un volume marchand de $332 \text{ m}^3/\text{ha}$. Il est à noter que cette quantité d'environ 400 n'est probablement pas anodine : elle serait en fait fondée sur la manière spécifique dont la volumétrie à l'intérieur d'une placette est calculée

sur le terrain, d'une part et pour le LIDAR, d'autre part. D'un point de vue géométrique, pour fins de comparaison, l'équation générique à appliquer aux deux types de mesures sera :

Volume (ou contenance) = nombre d'arbres * (hauteur * rayon de tronc ou couronne² * δ). Avec l'inventaire de terrain, on a obtenu en moyenne 41 arbres par placette, d'à peu près 14 m de fût chacun (soit 17 m de hauteur totale, dont 15 % sont à retrancher parce que non marchands). Le tronc de ces arbres mesure moins de 9 cm de rayon moyen (en supposant un léger défilement du DHP moyen de 20 cm). Pour la placette, le volume total sera donc de moins de 14 m³ de bois empilé : $41 * (14 * 0,09 * 0,09 * \delta)$. Dans le cas du LIDAR, on a plutôt 25 arbres dominants. On sait par les études d'arbres que la largeur de couronne moyenne de ces arbres est de plus de 4 m. Le nombre théorique de 25 provient donc de la surface de la placette, de 400 m², divisée par 4 m au carré. De plus, ces arbres ont 15 m de haut (soit 14 m de hauteur laser moyenne / 94 % de recouvrement laser). La contenance totale de la placette sera donc : $25 * (15 * 2,0 * 2,0 * \delta) \cong 5\ 300\ \text{m}^3$. Le facteur approximatif de 400 pourrait donc émaner du rapport entre ces deux calculs géométriques (5 300 / 14).

Le produit de toutes les étapes de calcul se trouve en quelque sorte synthétisé dans le tableau C.1, qui liste les chiffres de chaque variable d'intérêt (terrain, LIDAR, facteurs techniques ou écologiques et autres : cartographie, classification), par placette, tels qu'ils ont été employés pour les fins de statistique. On a alors pu calculer une mesure de tendance centrale et de dispersion pour chaque distribution de variable, sans détecter de problème particulier. Comme il était anticipé étant donné les commentaires précédents, le volume marchand brut s'avéra la seule variable sortant (un peu) des limites recommandées, en montrant une queue asymétrique vers les valeurs élevées de volume, sans doute à cause de l'absence de placettes de petit volume dans l'échantillonnage.

5.5 Analyse de la volumétrie dans les placettes

5.5.1 L'analyse des relations statistiques

Les valeurs des variables de terrain et laser du tableau C.1 pour les 38 placettes-échantillons ont été décrites et traitées à l'aide du logiciel de statistique SPSS (*voir* tabl. 5.3).

On trouvera également au tableau 5.3 les résultats les plus intéressants parmi les tests effectués, qu'il s'agisse de corrélations, de régressions ou d'autres tests statistiques. En ce qui concerne les simples corrélations, l'objectif étant de détecter des relations potentielles par l'analyse des coefficients de corrélation de Pearson bilatéraux, plusieurs se sont effectivement révélées significatives (*voir* tabl. 5.3, 2^e page). Pour la hauteur des arbres comme telle (*thauteur*), qui n'était pas l'objet direct de notre étude, on savait que la force de toute relation serait diminuée par le passage obligé à travers le DHP, une mesure reliée en partie à la hauteur. Dans ces circonstances, le meilleur traitement possible pourrait être la contenance laser brute (*lcb brute**2*) avec un r de 0,54, ce qui n'est pas surprenant puisque tout traitement supplémentaire du signal laser a pour effet indirect de modifier la moyenne des hauteurs à ce niveau. Pour les mêmes raisons, la force des relations du laser a été meilleure avec la surface terrière (*tsurfter*), jusqu'à 0,78 pour le seuillage à la moyenne (*voir* tabl. 5.3, 3^e page).

Les relations entre calculs volumétriques sont plus intéressantes, en commençant par celles impliquant le volume marchand brut : toutes les contenances laser lui sont significativement reliées (r entre 0,52 et 0,81, toutes essences confondues). Un calcul de volume marchand où seuls les DHP supérieurs à 15 cm ont été gardés donne des résultats légèrement moins bons. L'expérimentation de volumes de terrain plus développés dans l'espace n'a pas donné d'aussi bons résultats : à la fois pour le volume de canopée théorique et celui au sol, la meilleure relation provient de la contenance géométrique par essence (0,72). Cela n'est pas étonnant, quand on considère que ces calculs au sol comportaient à la fois un déploiement spatial et un ajustement pour l'essence, comme pour le LIDAR. Dans tous les cas de corrélation, on commence à voir un patron se dégager, à savoir que les relations quadratiques sont meilleures que les linéaires.

Suite à ces premiers résultats encourageants, on a pu continuer à explorer plus à fond les variables qui présentaient des affinités entre elles. Par exemple, la relation entre les mesures de volumétrie brutes a été examinée en détail. La figure C.2 donne la confirmation visuelle de la corrélation de 0,72 obtenue entre les deux variables en cause (volume marchand et contenance laser brutes). On constatera aussi la plus faible dynamique du signal laser (lorsque la croissance du DHP n'entraîne pas d'augmentation de la contenance) et, on

remarquera la quasi absence d'observations sous les 200 m³/ha. L'étape suivante consistait à produire des courbes de régression pour les paires de variables les plus prometteuses, dont on retrouvera les résultats (r^2) également au tableau 5.3. Dans presque tous les cas, les régressions ont été établies en prenant la variable «laser» comme facteur prédictif et la variable «terrain» comme prédiction. Le lien de causalité est à l'inverse de cette relation, mais on a préféré cet arrangement parce qu'on veut utiliser des équations pour prédire le volume de terrain à partir du LIDAR. Les résultats oscillent entre 0,45 et 0,77 pour les modèles linéaires ou quadratiques. Dans le premier cas, les meilleures variables prédictives sont : le 85^e rang centile (0,62), la grille de 4 m et l'interpolation seuillée à la moyenne (0,55 chacune), pour la prédiction du volume marchand brut seulement. L'essai de régression exponentielle donna un résultat entre les deux autres modèles.

Quelques régressions significatives ont été tracées à la figure C.3 (on y trouvera aussi les équations de régression des modèles utilisés). En a), on voit la relation brute; en b), l'interpolation de base; en c), on constate que le seuillage diminue les contenances et en d), qu'un modèle géométrique les augmente. De plus, ces graphiques illustrent le meilleur ajustement des courbes quadratiques. De fait, c'est à ce niveau que des r^2 plus élevés ont été obtenus. Pour des relations à une variable prédictive du volume brut, se démarquent : l'interpolation seuillée à la moyenne (0,77), l'interpolation de base (0,72) et le 85^e rang centile (0,69). Les courbes quadratiques obtenues montrent une relation croissante-décroissante, causée par une dispersion dans les plus basses valeurs (manque de données de moins de 200 m³/ha). Nous utilisons ces fonctions quadratiques pour plus de simplicité, mais nous reconnaissons sur le plan théorique qu'on devrait obtenir une relation toujours croissante en y.

Dans le cas des volumes théoriques de canopée et au sol, les résultats sont encore une fois plutôt décevants (0,51). Suite à la constatation qu'une forme de seuillage à la moyenne pouvait améliorer les relations impliquant la contenance interpolée, nous avons calculé les valeurs d'une variable supplémentaire appelée *lcb brutse*, qui constitue l'équivalent, pour les hauteurs brutes : à partir des hauteurs brutes déjà disponibles, nous avons retranché tous les points de valeur moindre que la moyenne de hauteur brute dans la placette puis nous avons

recalculé une moyenne sur ce sous-ensemble. La volumétrie finale est établie comme dans le cas des autres contenances brutes. Toutefois, les résultats de cette démarche supplémentaire ne se sont pas avérés supérieurs à ce qui avait déjà été évalué ($r^2 = 0,62$). Il semble donc que le signal laser brut, non interpolé ou traité d'autre façon, ne soit pas aussi propice à des relations volumétriques, probablement parce que l'intervalle de distance entre les points laser voisins n'est pas utilisé dans ces calculs.

Afin d'améliorer encore les relations précédentes, diverses combinaisons de variables explicatives ont été testées conjointement. Par exemple, l'ajout, au modèle de la contenance interpolée de base, de la hauteur brute du LIDAR n'apportait pas de signification plus grande. D'ailleurs, une tentative d'analyse en composantes principales (ACP) a démontré que toutes les variables laser de hauteur et de volume calculées étaient trop proches entre elles pour ce genre de modélisation, puisqu'une seule composante a été montrée comme significative. D'autre part, l'ajout du taux de recouvrement forestier aux modèles linéaires bruts ou interpolés définis plus haut pourrait donner de bons résultats et a été traité plus avant (voir art. 5.5.3).

5.5.2 La recherche de la meilleure relation empirique entre LIDAR et terrain

Les résultats qui relient de façon linéaire ou quadratique le volume marchand brut au signal laser interpolé dépassant les 0,6 de r^2 , il y avait lieu d'investiguer le comportement individuel des deux types de couvert ciblés, un feuillu et un conifère. On utilisa alors la catégorie de composition de peuplement déduite de l'inventaire terrain (*es60pct*) comme séparateur des placettes en deux sous-groupes égaux : PET (pour le tremble) et MXE (pour l'épinette blanche et la forêt mixte). Plutôt que le nombre de tiges, on a utilisé le volume comme discriminant parce que ce dernier peut être déduit à la fois des données de terrain et des données laser. Il ressort de cette séparation en deux équations que le peuplier serait plus aisé à modéliser : parmi les meilleures relations quadratiques, on trouve l'interpolation seuillée (0,83), le modèle géométrique et celui du 85^e rang centile (0,81). Pour ce qui est du type de peuplement mixte, les mêmes variables explicatives donnent respectivement 0,63,

0,58 et 0,53 seulement. Selon nous, l'explication de cette dichotomie provient de la nature plus hétérogène du couvert mixte résineux. L'apparence d'une canopée de peupliers vue d'en haut doit être moins rugueuse (on le voit sur des photo aériennes d'ailleurs), leur couronne étant plus elliptique. L'échantillonnage fonctionne donc mieux dans cette situation moins accidentée. Il faudra, pour rendre opérationnelle cette approche, effectuer une pondération en fonction de l'abondance relative des espèces. L'information sur les espèces peut être obtenue à partir d'images multispectrales (vert – rouge – proche infrarouge).

Dans un autre ordre d'idée, nous avons tenté de pallier à ce qui nous semble la principale limite de cette expérience, à savoir le manque d'observations de bas volume sur le terrain. Cette situation est due à l'emplacement des survols (zone de conservation contenant surtout des peuplements sur-matures) et, au fait qu'un deuxième survol, en zone d'aménagement cette fois, n'a pu être réalisé en raison des coûts excessifs qu'il aurait entraînés. Il s'agissait d'ajouter des placettes de bas volume sans retourner sur le terrain, en adoptant une approche conservatrice. À cette fin, nous avons effectué une mise en classes des volumes existants, ce qui rendait possible l'ajout de 12 «simili-placettes» choisies au hasard parmi 20, dans les zones dégarnies à l'écart des placettes réelles, à l'aide d'une orthophoto et d'images infrarouge du lac Duparquet (voir fig. 5.12). Bien entendu, il n'est pas assuré que le contenu de ces milieux soit stocké en peuplier ou en épinette. Deux groupes de 6 imageries chacun ont alors été formés, le premier pour une estimation de moins de 100 m³/ha et le deuxième, pour l'intervalle 100-200 m³/ha. Puis des classes de volume de 1 (pour les quantités inférieures à 100 m³/ha) à 6 (pour les quantités supérieures à 500) ont été attribuées aux 50 observations réunies (38 + 12), tant pour le volume marchand de terrain que pour la contenance laser interpolée. Le résultat montre une majorité dans les classes de volume moyennes (tabl. 5.4).

Tableau 5.4 Nombre de placettes par classe de volume

Classe de volume		Terrain	Laser
minimum	1	6	5
faible	2	7	6
moyen	3	19	17
fort	4	10	11
très fort	5	5	10
maximum	6	3	1
Total		50	50

La figure 5.13 constitue l'illustration de la relation investiguée avec cette répartition. On y observe bien sûr une assez bonne ressemblance entre les deux distributions (exactitude de la matrice de confusion de 56 %), ce qui confirme que le signal laser contient la dynamique (ou intervalle de valeurs) nécessaire pour permettre de discriminer entre différents volumes, qu'ils soient faibles, moyens ou forts. Pour pousser à fond cet aspect de la recherche, on testa les régressions quadratiques de la classe de volume de terrain prédite par le signal laser interpolé ($r^2 = 0,76$) ou par grille ($r^2 = 0,80$). Ce dernier chiffre surprend peu quand on pense qu'une mise en grille se rapproche d'une mise en classes implicite. L'ajout dans ce type de relation du taux de recouvrement à la meilleure variable prédictive individuelle, soit *lcseuil*, rendit le score appréciable de 0,86 (voir art. 5.5.3 pour la raison de cet ajout). Cela constitue le deuxième meilleur résultat statistique de toutes les relations volumétriques.

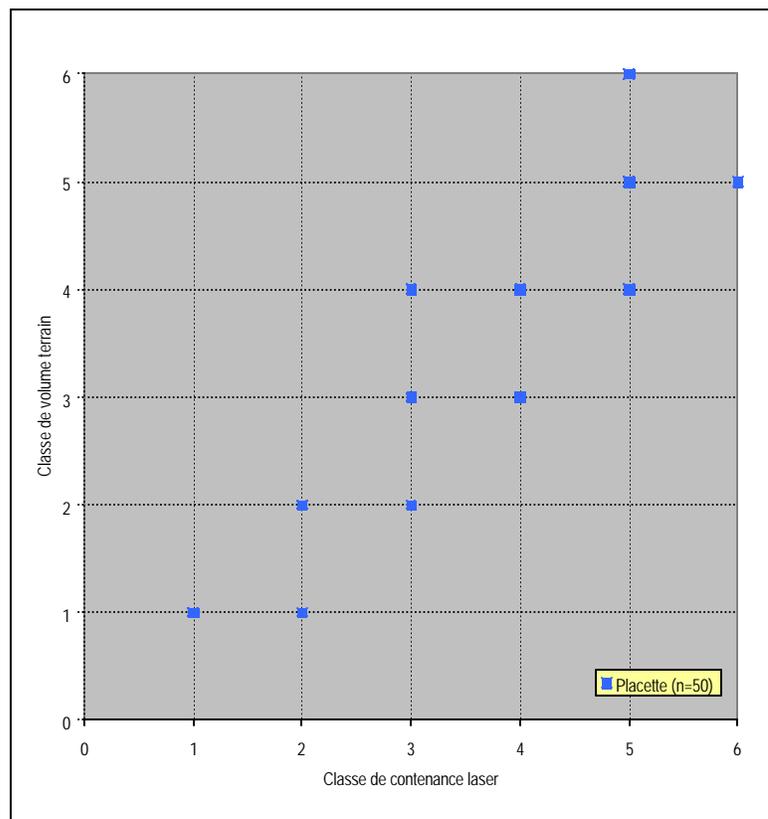


Figure 5.13 Classe de volume marchand brut en fonction de la classe de contenance laser interpolée.

5.5.3 L'investigation des facteurs écologiques et techniques

Nous revenons au corpus de données à 38 placettes. Parmi les facteurs écologiques, c'est-à-dire ceux qui pourraient expliquer la composition forestière, seul le drainage au sol semble un peu associé au volume ($F = 2,5$). Selon cette hypothèse, les plus forts volumes se trouveraient en terrain plat et dans les hauts de pente (près de 400 m³/ha) au détriment des sommets secs et des bas humides (moins de 300 m³/ha). D'autre part, les dépôts de surface lacustres argileux à graveleux seraient les plus favorables au peuplier ($F = 4,8$), du moins dans cette région. L'âge, le nombre de tiges par hectare, la pente et l'azimut furent jugés non significatifs pour la prédiction écologique (*voir par.* 4.2.4.3).

Parmi les facteurs qui réfèrent aux aspects plus méthodologiques et techniques de l'expérimentation, précisons d'abord que la cartographie des types de peuplement par le MRNQ (*cgroupe*s, regroupés en *Feuillus* ou *Mixtes*) paraît assez adéquate si on se fie à l'essence prédominante telle que répertoriée lors de notre inventaire : exactitude de la matrice de confusion de 53 % (tabl. 5.5). Le taux de pénétration du signal laser dans la canopée jusqu'au sol ne s'explique pas par l'azimut du terrain ($r = 0,15$) ni par le nombre de tiges à l'hectare, la pente ou l'espèce végétale. Et les différences de densité des points laser pendant les survols ne paraissent pas pouvoir être expliquées par la pente ou l'orientation du sol. Enfin, l'angle de visée du signal laser à partir de l'avion n'a pu être traité parce que cette donnée n'était pas disponible.

Dans un autre domaine, le taux de recouvrement forestier inféré du LIDAR (*lcouvert*) a été testé pour une relation éventuelle avec *ccouvert* (classe de couvert interprétée par l'auteur à partir d'une photo aérienne selon la codification du MRNQ, soit 4 pour moins de 40 %, 3 pour 40 à 60 %, 2 pour 60 à 80 %, 1 pour 80 à 90 % et 0 qui a été ajouté pour plus de 90 %).

Tableau 5.5 Matrice de confusion des types de peuplement

		TES60PCT			Total
		EPB	MXT	PET	
CGROUPES	FEU	1	4	6	11
	MXT	7	7	13	27
Total		8	11	19	38

Cette corrélation est de -0,5 pour les 50 placettes et simili-placettes (fig. 5.14). Au fur et à mesure que la densité augmente, le LIDAR continue à augmenter ses mesures, alors que l'interprétation de la photo fait plafonner le couvert, à cause de la saturation des ombrages.

Il a donc paru intéressant d'explorer davantage ce facteur pour voir s'il pourrait contribuer à améliorer les modèles en l'ajoutant à une variable prédictive en place. Nous retournons alors au corpus de données à 38 placettes. De fait, le recouvrement seul ne s'est pas avéré une mesure pouvant contribuer significativement à la prévision du volume marchand brut, pas plus que le taux de pénétration du signal laser, la pente ou la densité des points laser. Toutefois, l'ajout du recouvrement au modèle impliquant la contenance laser interpolée de base s'est avéré profitable parce que la corrélation était supérieure (0,79 contre 0,72 pour la contenance seule). C'est ainsi qu'on obtint un r^2 amélioré de 0,62 pour le modèle linéaire à deux variables prédictives (voir fig. 5.15) et de 0,78 en mode quadratique du 2^e degré ($a + bx + cy + dxy + ex^2 + fy^2$). Puisque l'interpolation laser seuillée à la moyenne avait donné une prédiction encore meilleure en tant que variable unique, il était pertinent de tester également ce modèle avec l'ajout du recouvrement. Un r^2 de 0,8 fut alors atteint, ainsi que 0,88 pour le modèle spécifique au peuplier, ce qui constitue la meilleure prédiction de toutes celles investiguées dans cette recherche. La dernière régression donne environ 50 m³/ha d'écart-type résiduel, un chiffre bas qui est adapté aux besoins de la gestion forestière.

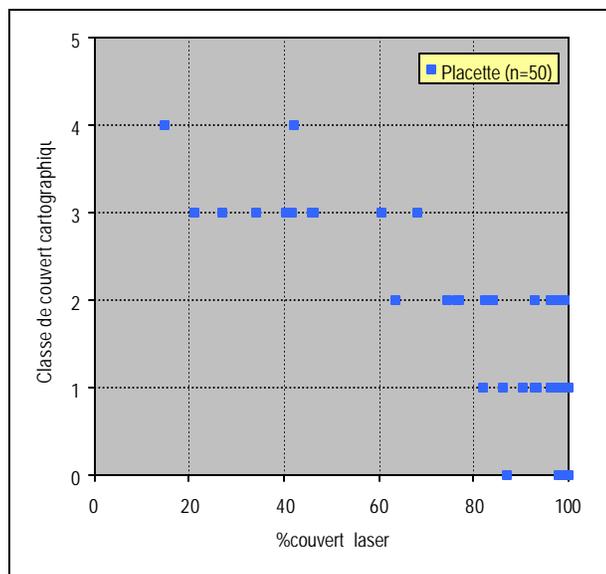


Figure 5.14 Classe de couvert cartographique en fonction du couvert laser.

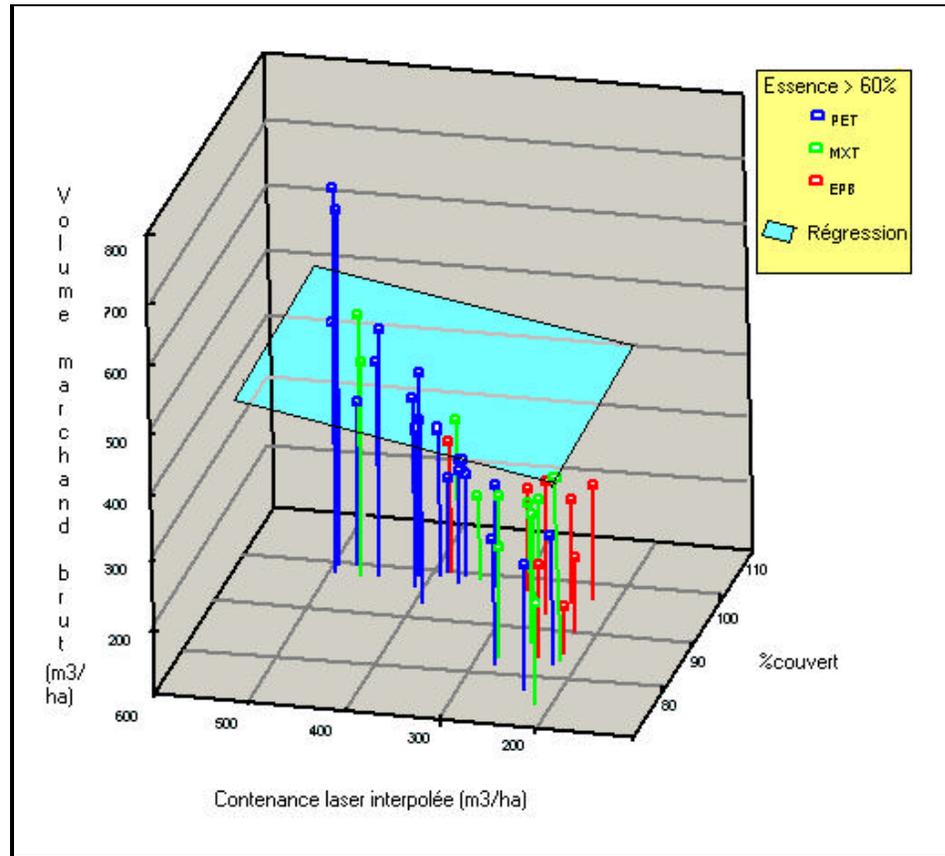


Figure 5.15 Volume marchand brut en fonction de la contenance laser interpolée et du couvert.

5.6 Extension spatiale à la région d'étude

Une première analyse de sensibilité aux changements d'échelle a été effectuée en calculant la contenance laser interpolée de base pour des surfaces de placette élargies à 100 m de côté (un hectare) et, en la reliant au volume marchand (placette de 20 m). Le résultat négatif (corrélation : 0,09) montre que la comparabilité peut chuter beaucoup lorsqu'on mélange les échelles. Il s'ensuit que l'exactitude positionnelle est un facteur clé pour l'exploitation de cette technologie. Cependant, on a quand même voulu approfondir les répercussions des changements d'échelle en faisant une extension spatiale, à toute la zone de survol, des relations terrain-LIDAR trouvées pour les placettes. Cette opération demandait, d'une part, la répartition du territoire en strates forestières et, d'autre part, le calcul de

contenances laser étendues (*voir par.* 4.2.5.2). À cause de sa bonne performance générale et de limites de temps, seule la contenance laser interpolée de base a été calculée et donc analysée à cette échelle.

5.6.1 La cartographie des volumes forestiers

Il s'agissait de déterminer les paramètres cartographiques disponibles les plus aptes à une extension spatiale de la volumétrie des espèces recensées dans les placettes. En toute logique, il est apparu qu'une combinaison du groupe d'essences, de la classe de densité et de celle de hauteur permettrait le mieux de coller aux modèles déjà obtenus. Il devient alors relativement facile d'associer les strates ainsi développées à toute la région d'étude par l'intermédiaire de la carte écoforestière du MRNQ. Effectivement, on obtint 48 polygones répartis dans les 8 strates forestières (*voir fig.* 5.16). Bien que la répartition des placettes et des polygones dans les strates ne soit pas idéale, le faible nombre de placettes valides ne laissait pas tellement de marge de manoeuvre. On remarquera la bonne concentration de feuillus au nord-est de la zone. Il est intéressant de voir le patron de répartition qui se dégage des classes.

Afin de tirer parti des données laser réparties sur toute la zone, on passe de la contenance laser à un volume marchand brut prédit par l'équation de régression qui a été déterminée pour la relation *linéaire* de l'interpolation de base pour toutes les placettes, soit $43,9874 + 0,8412 * \text{laser interpolé}$. Rappelons que l'écart de volume prévu pour cette relation est d'environ $75 \text{ m}^3/\text{ha}$, à l'échelle des placettes. Le tableau C.2 présente pour chaque polygone de chaque strate les divers paramètres qui ont été déduits de la cartographie (les facteurs écologiques) ou du terrain (les volumes) ou encore qui sont prédits par le signal laser. Les 48 polygones (environ 10 ha chacun) des 8 strates couvrent 490 ha au total, soit environ 5 km^2 dans les limites de *Survot laser*. La prédiction du volume ligneux total oscille entre 100 et $150\,000 \text{ m}^3$ selon qu'on prenne l'approche «LIDAR» ou «terrain». On observe donc le même genre de sous-estimation du volume par le LIDAR que dans les tests précédents. Pour ce qui est des volumes moyens à l'hectare, on constate la présence de

plusieurs polygones d'assez faible occupation, un fait dont on aurait eu avantage à profiter lors de l'inventaire physique afin de développer des relations possiblement plus fortes par la suite. À cette échelle de territoire, l'écart terrain-LIDAR augmente donc quelque peu mais reste raisonnable à environ 100 m³/ha, ce qui semble étayer la validité de cet exercice d'extension spatiale. Il demeure que le signal laser pourrait sous-estimer les volumes réels du tiers, une proportion maximale qui devrait normalement être réduite si des expériences comprenant un inventaire de terrain fiable à cette échelle étaient menées à bien.

L'étape suivante consiste en la mise en carte des résultats volumétriques étendus à la région d'étude. La figure 5.17 montre la répartition du volume marchand brut à l'hectare dérivé des 38 placettes et reporté dans leurs strates respectives. Il est possible de visualiser la colline principale au centre, plus dénudée, et les zones beaucoup plus riches situées de part et d'autre. Le problème en est ici un de surévaluation car il est bien entendu que des parties de cette forêt font moins de 200 m³/ha (Harvey, 2000), ce que la répartition actuelle des classes ne peut bien exprimer visuellement. Dans la figure 5.18, c'est le volume marchand prédit par le signal laser qui est ramené à des moyenne par strate. On constate alors en légende le décalage d'environ 100 m³/ha existant avec la carte précédente. Le patron spatial général est cependant le même que pour le volume de terrain par strate.

La figure 5.19 reprend la carte du volume marchand prédit par le LIDAR mais en conservant la valeur *locale* du signal laser pour 15 362 «pixels» de 20 m de côté (*voir* par 4.2.5.2). Elle permet donc d'apprécier la résolution plus fine de l'instrumentation laser employée (par rapport à une cartographie conventionnelle), un de ses avantages d'ailleurs. On relèvera aussi la grande étendue rendue possible par cette technologie (moins de 50 m³/ha à près de 600 m³/ha), qui ne semble pas limitée dans les extrêmes en forêt. La variabilité de la prédiction des volumes est détaillée dans les dernières colonnes du tableau C.2. À l'intérieur des 48 polygones, elle est de 60 m³/ha en moyenne (écart-type), variant de 37 à 109. Le coefficient de variation (CV) est assez uniforme. Il semble plus élevé pour les strates formées de gros arbres et à faible stocking. Malgré que la gestion forestière actuelle soit faite sur la base des peuplements, on voit que le CV varie de 30 à 40 %. Pour ce qui des 8 strates, l'écart-type va de 62 à 109 m³/ha. L'écart-type parmi les polygones de chaque strate va de 22 à 59 m³/ha.

D'autres tests statistiques furent effectués, visant à trouver un lien entre le signal laser tel qu'étendu à la région d'étude et diverses autres variables. Il s'en dégage une relation possible avec le type de peuplement cartographique ($r^2 = 0,61$) alors que les feuillus donnent près de 300 m³/ha, les résineux, 150 et la forêt mixte, plus de 200. Étrangement, la classe de hauteur cartographique n'est pas reliée significativement au LIDAR, ce qui peut confirmer le fait connu que la photo-interprétation de la hauteur est un processus entaché d'erreur (Avery, 1978). Par contre, la classe de densité cartographique rendit 0,65 de r^2 , soit 335 m³/ha pour plus de 80 % de recouvrement, 279 pour 60 à 80 %, 211 pour 40 à 60 % et 188 pour moins de 40 %.

Enfin, la figure C.10 constitue en quelque sorte l'aboutissement de toute cette démarche, du moins du point de vue de l'ingénieur forestier, puisqu'elle déploie, sur un plan droit libéré des contingences du relief, mais en perspective, la volumétrie de la forêt sur toute la région d'étude. Les dégradés de couleur (bleu pour les petits volumes à rouge pour les plus grands) renforcent la lecture. On peut aisément repérer les zones les plus mûres pour l'exploitation à l'est et à l'ouest de la région et le milieu plus dénudé au centre. Une compagnie forestière pourrait ainsi facilement quantifier et situer ces volumes ligneux dans le territoire.

CHAPITRE VI

DISCUSSION

Dans ce dernier chapitre, nous ferons d'abord un court bilan des résultats obtenus, avant de situer ceux-ci dans le contexte plus large des expériences en altimétrie laser effectuées par différents chercheurs. On traitera aussi des limitations de la technologie LIDAR et des applications possibles dans le domaine forestier.

6.1 Bilan des résultats

Notre recherche consistait à explorer divers traitements possibles de signaux d'un altimètre laser aéroporté dans le but de déterminer si cette technologie était apte à mesurer le volume ligneux et ce, dans diverses conditions écologiques de composition floristique, de recouvrement végétal et de relief. Ceci nous a amené à compiler un échantillonnage de terrain comprenant entre autres 38 placettes de 20 m de côté réparties sur un territoire de 5 km² en forêt boréale abitibienne et, dans lesquelles prédominaient le peuplier faux-tremble et, à un moindre degré, l'épinette blanche. Un volume moyen par placette de 332 m³/ha a été calculé par la méthode de tarif de cubage préconisée par le MRNQ au Québec.

Le volume ligneux dans un territoire est déterminé surtout par trois variables pour lesquelles il s'agissait donc d'analyser individuellement et en combinaison les possibles relations entre leur estimation «terrain» et «LIDAR» : la *hauteur*, pour laquelle on a trouvé une sous-estimation de l'altimétrie laser de près de 3 m (17 m sur le terrain – 14 m pour le LIDAR); la *densité* en tiges à l'hectare, pour laquelle on n'a pas obtenu de relation significative (cependant la notion apparentée de surface terrière a bien fonctionné avec un r^2 de 0,67, ce qui illustre la contribution du DHP); le *recouvrement*, qui est relié au couvert cartographique par un r^2 de 0,5. L'intégration de ces paramètres à des modèles prédictifs du volume marchand brut basés sur le LIDAR a été positive, notamment pour celui de la hauteur brute du signal laser, qui donna 0,52 (linéaire) et 0,66 (quadratique). Mais les méthodes les plus performantes furent l'interpolation de la hauteur donnée par le LIDAR

(0,72) avec 342 m³/ha de contenance moyenne (PET : 392, mixte : 291) et sa version seuillée avec 247 m³/ha (0,77). L'ajout du recouvrement améliore encore la régression jusqu'à 0,80. L'écart-type résiduel se tient entre 50 et 75 m³/ha.

On remarquera aussi que les modèles du LIDAR pour le peuplier prédisent plus exactement le volume (jusqu'à 0,88) que ceux pour la forêt mixte et l'épinette combinées (jusqu'à 0,65) : cette dernière comptait peu de placettes, de faible dynamique, avec un degré de mélange assez variable. Des essais en vue de prédire des volumes de terrain *développés* dans l'espace (canopée, au sol) à partir du signal laser n'ont pas aussi bien fait (0,51 au mieux). Par ailleurs, nous avons aussi incorporé 12 simili-placettes de plus bas volume que celles de l'inventaire au modèle seuillé (0,86). Enfin, l'extension du modèle linéaire d'interpolation de base à toute la région d'étude a donné plus de 100 000 m³ de volume et a bien réagi lorsque comparée aux volumes dans 8 strates cartographiques (0,77). Finalement, on a pu déterminer des modes de représentation graphique adaptés à ce genre de données. Certains de ces aspects méritent un retour explicatif ou critique sur les résultats.

En ce qui concerne les modèles prédictifs à une variable, on constate que les données du LIDAR interpolées prédisent le volume plus efficacement que les données brutes, parce qu'on tient alors compte des trois axes de volumétrie (x, y, z) : la valeur de chaque hauteur mesurée est en quelque sorte pondérée par l'aire de voisinage de chaque point laser. La méthode des diagrammes de Voronoï utilisée à cette fin est réputée ne pas entraîner d'artefacts. Le seuillage adaptatif (selon la moyenne de hauteur) semble une approche solide, sans doute à cause de sa double nature proprement volumétrique *et* réductrice du bruit : les petits arbres non inventoriés sur le terrain sont ainsi éliminés et, plus on monte en hauteur dans la canopée, moins le LIDAR a de chance de frapper une branche latérale.

Il est possible que les régressions quadratiques sur le volume se comportent mieux que les linéaires parce que le signal laser ne serait pas en mesure de «voir» le sous-bois et qu'il y aurait donc saturation (du moins avec ce modèle précis d'altimètre). Lieffers *et al.* (1996) confirment d'ailleurs l'importance de la présence de régénération en épinette sous le peuplier, de distribution d'âge inégale. Une autre possibilité d'explication de ce phénomène

est l'interpénétration des couronnes. À faible densité, les arbres d'une forêt se touchent à peine. Mais lorsqu'il y a densification, les couronnes s'entremêlent et le volume continue à croître sans que le LIDAR ne réagisse à cette augmentation de la densité. Cette interpénétration est moins grande pour les conifères, ce qui expliquerait que le second degré améliore très peu les résultats obtenus pour les modèles portant sur l'épinette (0,63 contre 0,52 de r^2).

Les formes de contenance qui sélectionnent une partie des retours laser en éliminant les valeurs basses (centile, grille, seuillage) fonctionnent mieux que les autres parce qu'elles ont pour effet de ne garder que les arbres dominants, mieux mesurés par le LIDAR. Pour confirmer cette hypothèse, nous suggérons de prendre en note la position sociale (hauteur relative et voisinage) de chaque arbre lors d'un inventaire et de séparer les relations en deux parties (dominants, co-dominants, à ensoleillement direct d'une part, intermédiaires et opprimés restants d'autre part). Selon Smith (1963), la forme et la largeur des couronnes est différente selon que la forêt est plus ou moins ouverte, un fait qui pourrait expliquer en partie les résultats moins convaincants obtenus avec nos tests de volumes déployés théoriques. Lorsqu'on cherche à améliorer les modèles du volume par interpolation laser en ajoutant un deuxième facteur prédictif, le recouvrement de canopée se trouve le facteur qui améliore le plus la prédiction, parce qu'il est lui-même bien prédit par le LIDAR. Le recouvrement s'avère utile parce qu'il ajoute un certain contexte à la contenance, c'est-à-dire qu'il indiquerait si la contenance est due à la présence de grands arbres, d'arbres denses, ou les deux à la fois.

Il est clair que le volume ligneux correspond à une volumétrie aérienne différente selon l'essence forestière. On peut s'attendre théoriquement à ce que les modèles monospécifiques fonctionnent le mieux. Il se trouve que les peuplements de peuplier faux-tremble étaient en moyenne plus purs que les peuplements d'épinette blanche. Il y a également plus d'observations, avec une meilleure dynamique des données, ce qui expliquerait la performance supérieure du peuplier. La forme des couronnes (elliptique / pointue) serait aussi un facteur d'influence dans les modèles de prédiction. Ainsi, l'échantillonnage fonctionnera mieux pour une canopée moins accidentée parce que des variations moindres existeront alors à l'intérieur d'un intervalle entre deux points laser. Le corollaire est vrai pour le micro-relief du terrain, dont l'aspect plus ou moins accidenté influera sur l'altitude mesurée du sol.

Il ne faut pas négliger l'effet cumulatif des erreurs de positionnement GPS de l'inventaire de terrain et de celles des survols du LIDAR. Ces erreurs se combinent l'une à l'autre, ce qui entraîne une non correspondance entre les réalités mesurées et fait alors chuter les r^2 . De plus, il y a un effet de bordure à chaque placette : la prise en compte d'un arbre proche de la limite sur le terrain est binaire (mesuré, non mesuré) tandis que le LIDAR donne des lectures jusqu'en bordure, peu importe la configuration des arbres individuels. Il est probable que toutes ces erreurs tantôt sous-estiment, tantôt surestiment la relation terrain-laser. Dans le cas des mesures de terrain, ces erreurs ont pu varier de 1 à 14 m. Un positionnement plus exact (moins d'un mètre d'erreur) aurait permis d'obtenir de meilleurs résultats.

En comparaison, les erreurs de positionnement du LIDAR sont relativement faibles. La position relative des points en x, y est excellente le long d'une ligne de balayage mais moins bonne entre deux lignes. Les calculs d'interpolation peuvent aussi être influencés par le recouvrement des points à la bordure de deux lignes de vol et parce que chaque ligne a été survolée deux fois. La précision du LIDAR en z est difficile à vérifier puisque l'inventaire de terrain n'a pas permis de mesurer la hauteur de tous les arbres impliqués. Par contre, St-Onge (2000) a montré pour la même zone que la hauteur est bien mesurée par cette technique ($r^2 = 0,90$). Selon Williams et Schreuder (2000), l'inclusion de la hauteur comme déterminant du volume réduit la variance des modèles de prédiction du volume, même si elle est erronée de 40 % ou moins. Par ailleurs, l'absence de mesures de placettes sous les $200\text{m}^3/\text{ha}$ de volume a restreint la force des corrélations et les r^2 car le maximum de variation possible n'est pas atteint. Si on observe les zones de roche à nu, on voit que la contenance laser y est de zéro. Les prédictions pour de faibles volumes se révéleraient donc au moins aussi bonnes que pour les forts volumes.

Pour ce qui est de la cartographie d'un territoire aussi grand que la zone étudiée, la précision spatiale de 20 m pour la prédiction des volumes par le LIDAR (figure 5.19) est, fort probablement, la plus élevée rapportée à ce jour. Par ailleurs, on remarque une bonne variabilité du volume à l'intérieur des polygones de strate (de 37 à $109\text{ m}^3/\text{ha}$ d'écart-type). Le fait d'aborder la cartographie forestière par le regroupement en peuplements et en strates, tel que cela se pratique couramment, masque donc des variations spatiales importantes qu'il

serait utile de connaître pour optimiser le rendement économique des coupes. Il est raisonnable de penser qu'on pourrait couper moins pour une même valeur de bois usinée, ce qui résulterait en un coût et un impact environnemental moindres.

6.2 Les expériences comparables

Parmi les caractéristiques principales de notre étude, un positionnement de qualité et l'utilisation d'un capteur par balayage sont des éléments disponibles pour les chercheurs depuis quelques années, ce qui rend l'approche «par placette» possible et appropriée. Par contre, l'intensité d'échantillonnage effective obtenue par les survols répétés et les modèles volumétriques testés sont spécifiques. Le milieu mixte a été étudié dans le passé mais les résultats furent contradictoires (certains y trouvant un facteur de plus, d'autres, non). Rappelons d'ailleurs les résultats statistiques des expériences les plus similaires à celle-ci (voir tabl. 3.1), en terme de r^2 : 0,72 pour le volume (Maclean et Krabill, 1986); 0,65 (Nelson *et al.*, 1988); 0,78 (Nilsson, 1996); 0,78 (Naesset, 1997b); 0,73 (Lefsky *et al.*, 1998); 0,83 (Magnussen et Boudewyn, 1998); 0,90 pour la hauteur (Means *et al.*, 1999); 0,84 aussi pour la hauteur (Rieger *et al.*, 2000). Lowell (1997) a obtenu 0,86 par photo-interprétation, mais la hauteur avait été prise sur le terrain et non sur photo, ce qui invalide bien sûr toute comparaison. Dans le cas du radar, Fransson et Israelsson (1999) ont pu tirer 0,62 pour le volume. Smith et Ulander (2000) ont récemment obtenu 0,66 pour une relation du volume par peuplement de résineux finlandais avec un SAR («synthetic aperture radar») aéroporté opérant entre 20 et 90 MHz (CARABAS), ou environ 100 m³/ha d'écart-type. Mais la technologie radar n'a pas la même résolution que celle du LIDAR et présente des problèmes de bruit à faible volume et de saturation à fort volume. De plus, elle ne permet pas de voir le niveau du sol. Nos résultats situés entre 0,52 et 0,88 de r^2 se comparent donc bien à ces autres tests.

Cependant, aucun de ces travaux LIDAR n'est directement comparable avec cette recherche-ci puisque trop de paramètres sont en cause. Par exemple, s'il est vrai que Naesset (1997b) a pratiqué un échantillonnage par placette, il les a par la suite regroupées en plus grandes unités, changeant automatiquement l'échelle de son étude. Notons qu'un essai de

notre part en vue de reproduire les résultats de ce chercheur avec ses équations (la hauteur brute à une puissance, multipliée par la contenance par grille à une puissance) n'a donné que 0,54 de r^2 . Maclean et Krabill (1986) et Nelson *et al.* (1988) n'avaient pas accès au mode par balayage, seulement à un profilomètre, ce qui les empêchait de véritablement opérer dans les trois dimensions nécessaires à une comparaison réellement volumétrique.

Nilsson (1996), outre qu'il fit sa campagne en hélicoptère et avec un GPS en mauvais ordre de marche, obtint de bons résultats pour le volume seulement lorsqu'il utilisa un algorithme de recherche de la meilleure corrélation par incrément positionnel de 0,5 m dans un intervalle de 20 m, une méthode qui ne pourrait fonctionner en l'absence de données de terrain. Enfin, Lefsky *et al.* (1998) ont employé un LIDAR à grande tache, dont le principe est différent de l'altimètre laser que nous avons utilisé et, qui ne peut donner des images d'une résolution aussi fine qu'un mètre par exemple. Magnussen et Boudewyn (1998), Means *et al.* (1999) et Rieger *et al.* (2000) ont obtenu de meilleurs résultats que nous pour les hauteurs (mais ils comptaient sur des hauteurs d'arbre individuelles comme données de vérification). Si Magnussen et Boudewyn ont raison en disant que les facteurs clés qui conditionnent le succès de la télédétection des forêts par le LIDAR sont un échantillonnage très dense, l'habilité de localiser précisément les coordonnées tridimensionnelles des objets qui réfléchissent le signal laser et, un faisceau étroit produisant de petites taches au sol, alors nous estimons avoir rempli ces conditions dans cette étude.

6.3 Les limites

Une limite de la technologie d'altimétrie laser actuelle est l'aspect strictement quantitatif, c'est-à-dire orienté vers l'extraction de paramètres comme la hauteur et la densité. Le LIDAR ne «voit» sans doute pas l'âge, mais on peut estimer celui-ci en mettant en relation la structure et la composition du couvert avec ce qu'on connaît des successions dans les sapinières à bouleau blanc de la forêt boréale. Il est possible que des recherches à venir sur le LIDAR à courbe d'amplitude révèlent certains de ces éléments plus qualitatifs de la forêt. Cependant, des caractéristiques supplémentaires qui intéressent les compagnies forestières, comme la santé ou le dépérissement (forêt sur-mature) devront être obtenues d'autre façon.

Selon Wynne et Carter (1997), la perception des forestiers est aussi un facteur à considérer dans l'adoption des nouvelles technologies, notamment à propos de la résolution «trop faible» de la télédétection en général et sur les coûts associés. Dans notre cas, le coût des survols laser fut d'environ 12 000 \$ au total, donc 5 \$/ha, auquel, dans un contexte commercial, il faudrait ajouter certains frais de planification et de post-traitement. Cette somme est à mettre en rapport avec le coût de récolte des arbres, d'environ 500 \$/ha (soit 0,50 \$ * 1 000 arbres/ha), avec la mise à jour par photo aérienne ou par vidéographie, de 1 à 3 \$/ha et, avec la télédétection satellitaire (0,10 \$/ha et plus selon les traitements). Mais il faut noter que le coût de location d'un avion est relativement constant, que ce soit pour 500 ou 5 000 hectares. C'est pourquoi il est raisonnable de penser que les survols LIDAR routiniers pourraient se négocier à 2 \$/ha ou moins, ce qui les rendrait compétitifs par rapport à la photogrammétrie traditionnelle, surtout avec l'arrivée de modèles plus performants (ALTM1225).

Nos connaissances sont limitées sur certains aspects : certains auteurs ont constaté des artefacts et des rejets (points de valeur impossible) dans le signal laser brut. Le seul problème potentiel que nous avons détecté dans cette recherche est le patron de distribution irrégulier des points laser en zigzag qui aurait pu influencer négativement les algorithmes d'interpolation. Si on regarde les améliorations possibles, l'espace vide dans la canopée et son corollaire, le sous-bois occupé, sont deux aspects qu'on maîtrise encore mal (Tanaka *et al.*, 1998; Weishampel *et al.*, 2000). L'utilisation du LIDAR à courbe d'amplitude, qui permet de voir le sous-bois en détail, pourrait aider et permettre d'identifier les aires dégradées ou de repousse et, indirectement l'âge de la forêt. La fusion des données d'altimétrie laser et d'autres capteurs est un champ d'investigation prometteur. Du côté de la représentation graphique, grâce à l'augmentation de la puissance des ordinateurs et avec des algorithmes directs pour automatiser la chaîne de traitement, on envisage l'apparition d'environnements d'immersion en trois dimensions recréant en temps réel l'aspect d'une forêt, tel que déduit du LIDAR et d'autres capteurs.

6.4 Les applications

Il apparaît qu'on peut obtenir directement (avec un certain calibrage sur le terrain) la

prédiction du volume marchand brut pour de petites aires, par interpolation, en divisant la contenance laser par un facteur d'environ 400 (*voir* art. 5.4.3 pour l'origine de ce rapport) – moins pour les résineux, plus près de 425 pour les feuillus. Ce nombre, qui n'a rien à voir avec la dimension des placettes de l'inventaire et peut donc être valable pour différentes surfaces, est conditionné par trois ou quatre facteurs. Le principal facteur est bidimensionnel, c'est le degré d'amplitude de la couronne, d'environ 20 (qui sera plus faible en milieu résineux). Un facteur de dominance est aussi présent : il est de moins de 2 (41/25) sur le territoire investigué mais pourrait être supérieur (sans doute dans une forêt plus jeune) ou plus près de 1 (par exemple dans les plantations). Des travaux sont en cours sur l'analyse du signal laser pour des couronnes individuelles, qui pourraient contribuer à mesurer ce facteur (Dufort, 2000). La hauteur en tant que telle intervient à cause d'un facteur assez constant de sous-estimation par le LIDAR, documenté dans la littérature : un pourcentage de 10 à 15 % d'ajustement sera alors adéquat. L'essence (ou du moins le caractère feuillu ou coniférien) compte donc dans ces relations, mais c'est justement une donnée qui peut être dérivée de méthodes de télédétection autres. À cet égard, des données obtenues d'un MNT laser (altitude, orientation, pente, drainage, courbure) permettraient de raffiner la classification d'essences par images-satellite, en ajoutant si nécessaire la hauteur d'arbre déduite du LIDAR comme critère supplémentaire.

Nous suggérons donc des survols où plusieurs capteurs seront utilisés de front : en plus du LIDAR, une caméra optique numérique à plusieurs bandes, dont la panchromatique et l'infrarouge (Gong *et al.*, 1998, prônent l'utilisation de multiples capteurs dans une nouvelle discipline qu'ils appellent *écométrie*). Des appareils commerciaux allant dans ce sens sont d'ailleurs annoncés prochainement. L'âge nous apparaît comme un facteur probable d'influence, qui est cependant difficile à inférer des airs. Mais un relevé de base de l'âge pourra être fait (il existe d'ailleurs déjà au Québec). Les planificateurs n'ont pas toujours besoin d'un état détaillé car ils raisonnent souvent en terme de classes de 100 m³ de bois à l'hectare. L'effet net de cette nouvelle méthode LIDAR sera de couper les inventaires sur le terrain de moitié ou des trois quarts, en augmentant l'intervalle de temps entre chacun.

Un autre domaine d'application du LIDAR est le calcul de la biomasse végétale

aérienne. Celle-ci est souvent l'objet d'approximations en multipliant un volume forestier par la densité matérielle du bois qui est de plus de 550 kg/m^3 et en allouant 10 % de plus pour les autres tissus. Par exemple, sur cette base, la biomasse aérienne de la région d'étude, qui contient plus de $100\,000 \text{ m}^3$ de volume ligneux, se chiffrerait à quelque $60\,000\,000 \text{ kg}$ (ou $60\,000$ tonnes), soit 12 kg/m^2 (ou 120 tonnes/ha). Selon Stiell (1969), ce genre de modèle reliant la biomasse au volume s'est avéré bon à $0,95$ de r^2 pour l'épinette blanche entre autres. Paré et Bergeron (1995), qui ont étudié la chronoséquence de biomasse à la FERLD, ont vu un accroissement régulier de biomasse avec l'âge jusqu'à 17 kg/m^2 puis un déclin graduel après 75 ans. On observait 12 kg/m^2 autant à 50 ans qu'à 160. Notre zone d'étude contiendrait près de $30\,000$ tonnes de carbone dans la partie aérienne des arbres, sur la base connue d'une demi tonne de carbone par tonne de matière ligneuse.

Dans une perspective plus large, notre recherche s'inscrit dans l'optique de la gestion intégrée des forêts. Certains intervenants forestiers militent en faveur d'inventaires annuels permettant de faire le suivi de la dynamique de croissance et l'allocation des terres. Menée de façon traditionnelle, cette idée serait prohibitive. La connaissance précise des volumes ligneux est un des éléments importants pour l'étude de la productivité végétale, qui à son tour permettra de surveiller la santé des forêts, de déterminer l'absorption du gaz carbonique et d'agir sur la question des changements climatiques. Notons finalement qu'une maquette animée a été produite à partir du MNS du couvert végétal au lac Duparquet (fig. 6.1).

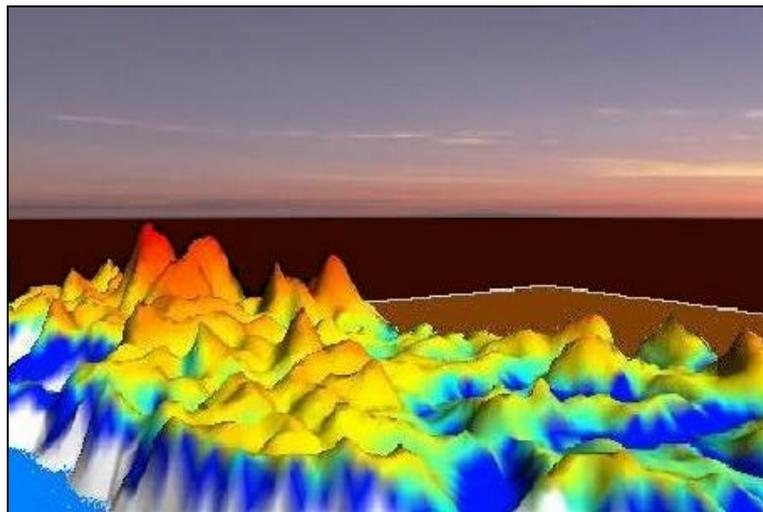


Figure 6.1 Vue en 2D d'un modèle numérique du volume ligneux au lac Duparquet

CONCLUSION

Le but de cette recherche était d'évaluer l'efficacité de la technologie de l'altimétrie laser pour la mesure et la cartographie du volume ligneux de peuplements mixtes dans la forêt boréale de l'Est du Québec. La technologie de l'altimétrie laser, en développement depuis plusieurs années, semble prometteuse pour l'optimisation des échantillonnages et inventaires sur le terrain. La combinaison d'un signal laser par balayage et à haute résolution, d'une intensité d'échantillonnage augmentée, d'un positionnement exact par INS-GPS et d'un modèle volumétrique approprié devait permettre de résoudre les dernières difficultés liées à cette technologie jusqu'à présent. Une question de recherche plus spécifique en découla : *les données d'altimétrie laser par balayage à haute résolution constituent-elles une voie de solution pour l'estimation du volume ligneux (celui d'une strate ou d'un peuplement plutôt que le volume individuel d'un arbre), en particulier pour le cas des forêts boréales, sachant que leur nouveauté fait en sorte que les méthodes de traitement restent à développer?*

L'objectif principal visé en découle naturellement, soit de valider des méthodes statistiques ou géométriques existantes de calcul du volume par LIDAR ou d'en mettre au point de nouvelles qui permettent d'obtenir une bonne prédiction des volumes ligneux mesurés sur le terrain, à l'échelle des peuplements. Certains objectifs subsidiaires ont porté sur :

- la contribution de l'essence à l'analyse;
- le comportement des modèles en situation d'extension territoriale à des strates;
- le mode de représentation visuelle des volumes : carte 2D ou 2D $\frac{1}{2}$ et animation;
- l'analyse de facteurs externes aux modèles (l'orientation, la densité de couverture des arbres, le taux de pénétration du signal laser, etc.);
- la mise en relation des volumes prédits avec les conditions écologiques des sites (dépôt, drainage, pente, âge des arbres).

Un territoire de 5 km² situé dans la zone de conservation de la Forêt d'Enseignement et de Recherche du Lac Duparquet, en Abitibi, au Québec, a fait l'objet de notre attention pendant plus d'un an. C'est ainsi que des mesures de volume dérivées d'un inventaire de terrain (moyenne de 332 m³/ha dans 38 placettes de 400 m²) fait à l'été 1999 ont été

comparées à des calculs de contenance obtenue à l'aide d'un LIDAR aéroporté (Optech ALTM1020), suite à trois survols pendant l'été 1998. Bien que plusieurs des relations à une variable explicative investiguées soient significatives (r^2 de 0,52 et plus, donnant 342 m³/ha), les tests statistiques reliant de façon quadratique chacune des huit contenances laser calculées aux volumes de terrain par placette ont révélé une adéquation plus grande de l'interpolation laser seuillée à la moyenne de hauteur (r^2 de 0,77). Le fait de tenir également compte du taux de recouvrement de la végétation plus grande que 4 m améliore cette relation (r^2 de 0,8). Cela est vrai plus particulièrement pour le peuplier faux-tremble (contrastant ainsi avec l'épinette blanche) : r^2 de 0,88 et fiabilité à 50 m³/ha près, sans doute à cause de sa couronne plus ovale. En effet, moins la canopée est d'apparence rugueuse (pentue), plus petit est le décalage de la hauteur donnée par le LIDAR en moyenne, par rapport au sommet des arbres.

Parmi les facteurs techniques ou écologiques investigués, seul le drainage au sol semble quelque peu associé au volume ($F = 2,5$). Bien qu'assez précise pour fonctionner à l'échelle de la placette, cette technologie se comporte correctement à l'échelle des strates (r^2 de 0,77). Elle est également bonne pour confectionner des MNT (r^2 de 0,94). Certains types de cartographie sont plus indiqués pour la volumétrie, soit la représentation en perspective et la carte animée. Enfin, nous recommandons que les inventaires visant à servir de «vérité-terrain» à ce genre de tests soient plus élaborés, surtout en ce qui concerne le nombre de hauteurs d'arbre mesurées par essence et l'étendue des volumes pris en compte. D'autre part, des pistes de recherche ont été esquissées, que ce soit l'utilisation de modèles géométriques plus réalistes ou de la courbe d'amplitude de certains LIDAR récents. D'autres voies de recherche sont : une meilleure discrimination des «rejets» (ces points laser situés assez près du sol : butte, chablis, etc.); la modélisation de l'espace en sous-bois par analyse de signaux multiples, l'automatisation du processus de calcul ou encore, une analyse de répétabilité. Il a donc été démontré dans ce mémoire que l'altimétrie laser par balayage à haute résolution permet l'estimation du volume ligneux des peuplements dans la forêt boréale mixte. Le potentiel opérationnel de ces techniques vient de l'exactitude et la rapidité d'exécution (possibilité d'automatisation), la localisation en 3D et la possibilité de «voir» le sol à travers le couvert forestier. Le suivi et l'optimisation des 40 millions de m³ de bois coupés par an au Québec demandent une connaissance à jour du territoire que le LIDAR peut aider à fournir.

APPENDICE A

**PROTOCOLE DE TERRAIN
ÉTÉ 1999
FORÊT D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE DU LAC DUPARQUET
GEIGER**

(Note : en collaboration avec Benoît St-Onge)

Note 1 : L'objectif 0 est préalable à toute autre activité. Les objectifs 1 et 2 sont d'importance égale et seront réalisés en alternance. Des rapports sur la progression des travaux permettront de déterminer en cours de route la modulation des efforts entre les objectifs 1 et 2.

Note 2 : La densité des points laser varie à l'intérieur de la zone survolée. Il faut s'assurer que toutes les mesures soient prises dans les secteurs de haute densité de points laser identifiés sur les cartes. On s'assurera de choisir des placettes planes, inclinées ou non, c'est-à-dire d'éviter les placettes dans lesquelles le terrain ondule.

Objectif 0 - Mise en place du matériel de positionnement

- Installer l'antenne, le GPS ALTO et faire les branchements au portable.
- Géoréférencer le chalet (CETEQ) en fonction des données de correction du MRNQ.
- Mesurer quelques points GPS à deux reprises à une journée d'intervalle et vérifier la correspondance des x, y, z après traitement différentiel (ces points ne sont pas forcément sur une placette mais sont plutôt facile d'accès, à proximité du CETEQ).
- À la première excursion sur le terrain, positionner au GPS quelques arbres correspondant à une protubérance clairement identifiable dans l'imagerie laser. Vérifier que les positions mesurées au GPS et par altimétrie laser correspondent bien.

Objectif 1 - Mesure de hauteur des arbres et de l'élévation du terrain

But : obtenir la localisation en x, y précise des arbres et mesurer leur hauteur afin de comparer la hauteur de ces arbres avec celles prédites par l'altimétrie laser.

Critères de sélection des arbres dont la hauteur sera mesurée :

- Espèce : tremble ou épinette blanche.
- La couronne de l'arbre doit être d'une dimension donnant de bonnes chances qu'un point laser tombe sur la couronne (diamètre de couronne d'au moins 4 mètres).
- La couronne de l'arbre est à **découvert** (non recouverte par d'autres couronnes et bien visible du haut des airs).
- La couronne devra autant que possible être bien **dégagée** (non imbriquée dans une autre) et l'arbre devra se trouver dans un environnement qui permettra facilement de le **distinguer** de ses voisins (d'après l'espèce, sa dimension, la distance qui le sépare d'autres arbres, ceci en raison des possibilités de confusion, en post-traitement, entre un arbre et des voisins similaires, à cause de l'erreur GPS d'environ 3 m).

100 arbres de chaque espèce devraient être mesurés. La mesure de la hauteur se fera selon les instructions données plus loin (Objectif 2). Les arbres mesurés à l'intérieur des placettes et qui correspondent aux critères énoncés plus haut peuvent être considérés. Il devront alors être **identifiés** dans le cahier de terrain comme tels (O1 pour Objectif 1). Leur positionnement peut être alors déterminé par ruban et boussole comme indiqué plus loin.

On devra de plus remesurer une dizaine d'arbres qui ont été mesurés quelques semaines après le survol laser, ceci afin de vérifier si les arbres ont significativement grandi entre juillet 1998

et juillet 1999. Ces arbres sont indiqués sur une image couleur de haute résolution et sont identifiés par des étiquettes métalliques sur le terrain. Prendre en note le numéro de l'étiquette. Cette remesure a pour but de déterminer si l'accroissement en hauteur des arbres, entre 1998, année du survol, et 1999, année de la présente campagne, peut amener un biais mesurable dans les données.

Méthodologie relative à l'objectif 1

- Étiqueter l'arbre.
- Noter dans le GPS le numéro de l'étiquette, l'espèce de l'arbre et son DHP.
- Placer le GPS en retrait de l'arbre et commencer la saisie de points après avoir entré le numéro d'étiquette de l'arbre dans le MC-GPS. Entrer l'offset sous forme de distance et d'azimut. La valeur de pente n'est pas nécessaire sur de courtes distances.
- Lancer la saisie du point GPS (5 minutes).
- Pendant ce temps, mesurer et noter dans le cahier la hauteur de l'arbre au clinomètre en deux positions séparées d'au moins 90 degrés (voir instructions détaillées à l'Objectif 2).
- Mesurer et noter dans le cahier le diamètre de la couronne dans les quatre directions cardinales géographiques.
- S'assurer que le point est correctement enregistré dans le GPS.

Objectif 2 - Mesure des placettes pour évaluation du volume ligneux

But : mettre en lien le volume ligneux par hectare avec les données d'altimétrie laser. Le volume ligneux d'un arbre dépend essentiellement, pour une espèce donnée, de sa hauteur et de son DHP. Le volume par hectare constitue la somme des volumes individuels et dépend donc aussi de la densité (nombre de tiges à l'hectare). Pour maximiser la signification statistique, à travers le nombre d'arbres par espèce, nous nous limitons à une espèce de feuillus (tremble) et une espèce de conifères (épinette blanche).

Positionnement d'une placette

La stratégie d'échantillonnage vise à couvrir **plusieurs conditions écologiques** (topographie - dépôt - drainage) pour plusieurs structures forestières (densité - hauteur). Ainsi, le positionnement des placettes doit refléter cette variabilité et est pour cette raison contrôlé par la carte éco-forestière. Cette carte n'étant pas suffisamment précise, il faudra repérer sur le terrain, aux endroits approximatifs suggérés par le plan d'échantillonnage dérivé de la carte, des placettes homogènes (au point de vue de la structure), autant que possible monospécifiques. On verra également à surveiller que des structures différentes soient échantillonnées (peuplement bas / haut, ouverts / fermés; voir instructions plus loin sous «Monitoring»).

Délimitation d'une placette

Chaque placette sera parfaitement carrée, mesurera 20 m par 20 m et sera orientée exactement selon les directions cardinales **géographiques**. Chacun des quatre coins est identifié par les lettres suivantes: **NE**= nord-est, **NO**= nord-ouest, **SE**= sud-est, **SO**= sud-ouest.

Une étiquette d'aluminium sera également clouée à l'arbre et son numéro noté avec celui de la placette. Le coin sud-ouest correspondra à un arbre qui sera identifié de façon permanente comme indicateur de placette au moyen d'un ruban rouge marqué GEIGER 1999 + No de la placette.

Une ficelle (topofil) sera déroulée de façon à délimiter parfaitement la placette. Ceci permet d'établir clairement les arbres qui se trouvent à l'intérieur de la placette. Si le terrain est en pente, un correctif sera apporté à posteriori à partir de la pente qui sera mesurée sur le modèle numérique d'altitude du LIDAR et validé par une mesure de terrain.

Mesure et positionnement des arbres

- Entrer les données générales sur la placette dans le GPS. Le coin SO de la placette doit être **précisément positionné au GPS**. Placer le GPS en retrait de quelques mètres du coin et entrer la valeur d'offset. Lancer la saisie de points (5 minutes).
- Mesurer et noter le **DHP** de tous les arbres (y compris ceux qui ne sont pas des espèces recherchées) pour les arbres dont le diamètre à hauteur de poitrine est égal ou **supérieur à 9 cm**. Marquer les arbres de façon non permanente à la peinture **bleue** afin de ne pas les recompter deux fois. Noter pour chaque arbre le **DHP et l'espèce**, de même que son état (vivant ou mort). Ne pas tenir compte d'un «snag» (arbre mort qui a perdu ses branches).
- Pour douze arbres **vivants** par placette (*voir* «Échantillonnage des arbres» plus bas), indiquer l'espèce, mesurer la position (*voir* «Position des arbres» ici-bas), la hauteur, le diamètre de la couronne, le DHP. Marquer ces arbres d'une étiquette d'aluminium et noter le numéro dans le cahier. Indiquer O1 si l'arbre correspond aux critères énoncés à Objectif 1.

Position des arbres

- Mesurer et noter la distance entre l'arbre déterminant le coin NE et l'arbre à positionner.
- Se placer contre l'arbre déterminant le coin NE et viser l'arbre à positionner. Noter l'azimut géographique.

Hauteur

- Mesurer et noter la distance entre l'observateur et l'arbre.
- Mesurer et noter l'angle formé par l'horizontale et le haut de l'arbre.
- Mesurer et noter l'angle formé par l'horizontale et le pied de l'arbre. Indiquer par un "-" le fait qu'il s'agisse d'un angle négatif le cas échéant.
- Si le sommet de l'arbre est difficile à voir, agiter l'arbre de façon à établir clairement la position de la cime.
- Si le pied de l'arbre est difficile à voir, mesurer l'angle formé par l'horizontale et un point visible sur l'arbre. Noter la hauteur de ce point. On peut prendre comme référence une personne adossée à l'arbre et noter sa hauteur.
- Prendre deux mesures de hauteur par arbre à partir de points de vue séparés par au moins 90 degrés sur un plan horizontal, ceci afin d'éliminer les erreurs de mesure grossières.

- Si l'arbre est penché, se positionner perpendiculairement à l'axe d'inclinaison de l'arbre; en d'autres termes, se positionner afin de voir l'arbre pencher à gauche ou à droite, et non vers soi ou au devant de soi.

Diamètre de la couronne

Mesurer et noter la distance qui sépare la surface du tronc de l'arbre de la projection verticale du plus grand diamètre de la couronne dans les quatre directions cardinales géographiques. Cette mesure sera corrigée en enlevant $0,5 * DHP$. Ne pas la corriger à la lecture.

DHP

Le diamètre à hauteur de poitrine se mesure à une hauteur de 130 cm. Noter à quoi cette hauteur correspond sur votre propre poitrine et se servir de ce repère ensuite.

Échantillonnage des arbres

Se placer successivement à chacun des coins de la placette en regardant vers l'intérieur. Viser dans la boussole successivement les angles 25, 50 et 75 degrés par rapport à la ficelle située à votre gauche. Retenir pour chaque direction le premier arbre visible de l'une des deux espèces choisies. On obtient ainsi $4 \text{ coins} * 3 \text{ angles} = 12$ arbres, choisis au hasard pour chacune des placettes.

Pente

Pour les placettes dont la pente est sensible, mesurer celle-ci en visant à l'aide du clinomètre depuis le point le plus bas, la tête de l'autre observateur placé sur le point le plus haut, en s'assurant que ces deux positions soient sur le pourtour de la placette. Noter le gradient de la pente et mesurer également l'azimut de la pente, du point le plus bas vers le point le plus haut.

Espèce

Indiquer l'espèce par les abréviations suivante :

Sb Sapin baumier
 Eb Épinette blanche
 En Épinette noire
 Pg Pin gris
 Th Thuya (cèdre)
 Ml Mélèze laricin
 Pf Peuplier faux-tremble (tremble)
 Pb Peuplier baumier
 Bb Bouleau blanc.

Suivi

La stratégie d'échantillonnage vise à rencontrer certains objectifs. Il se peut que la méthodologie exprimée dans ce document n'assure pas que les **distributions statistiques**

visées se réalisent. Il faut donc **vérifier régulièrement** que les données acquises ne dévient pas trop des objectifs d'échantillonnage. Un monitoring au niveau des placettes, des hauteurs et des DHP des arbres dont la hauteur a été mesurée devra donc être fait.

Suivi des placettes

Les placettes doivent être distribuées sur des positions topographiques variées, des types de dépôt variés, comporter des arbres dont la hauteur et la densité varient. Chaque placette devra donc être caractérisée par les cotes suivantes :

Position topographique (éviter les fortes pentes)

- A - Dépression
- B - Horizontale ou pente faible
- C - Pente moyenne
- D - Sommet ou crête.

Dépôts

- A - Argiles ou limons
- B - Dépôts fluviaux
- C - Tills.

Hauteur

- A - Moins de 15 m
- B - 15 - 20 m
- C - 20 m ou plus.

Densité

- A - Ouvert (beaucoup d'espace entre les arbres, le parterre est très ensoleillé)
- B - Moyennement fermé (les cimes laissent entrer de la lumière)
- C - Complètement fermé (les cimes forment un plafond presque continu).

Composition spécifique

- A - Dominance de tremble (plus des trois quarts des arbres sont des trembles)
- B - Dominance d'épinette blanche (plus des trois quarts des arbres sont des épinettes)
- C - Mixte.

Le but est de tenter d'obtenir une distribution plus ou moins égale des placettes dans chaque catégorie. Il faut donc faire un décompte régulier des placettes par catégorie et positionner les prochaines placettes de façon à corriger des biais s'il y a lieu. Il convient donc d'indiquer dans le cahier de terrain les cotes ABCD pour chaque variable à chaque placette.

Suivi des hauteurs

Pour chaque espèce, il faut **répartir** les arbres par classe de hauteur de façon la plus égale possible. Ainsi on souhaitera avoir un nombre à peu près égal dans les classes suivantes :

- A : 5 - 10 m
- B : 10 - 15 m
- C : 15 - 20 m
- D : 20 m et plus.

L'estimation de la classe de hauteur peut être faite à l'oeil sur le terrain sans vérification quantitative. Ces arbres peuvent être choisis dans un voisinage relativement rapproché. Ils seront toutefois tirés de la **zone de haute densité** de points laser présentée sur la carte.

Suivi des DHP

Les DHP des arbres dont la hauteur est mesurée doivent se répartir assez uniformément. On devra donc s'assurer d'obtenir un décompte grossièrement égal dans les classes suivantes :

- A - 9 - 15 cm
- B - 15 - 20 cm
- C - 20 - 25 cm
- D - 25 cm et plus.

Calcul de la hauteur d'un arbre

$$H = \tan(a * D) - \tan(b * D)$$

où

H = hauteur de l'arbre en mètres

a = angle mesuré vers le haut de l'arbre en degrés

b = angle mesuré vers le bas de l'arbre en degrés (habituellement négatif)

D = distance par rapport à l'arbre en mètres.

Calcul des coordonnées d'un arbre

À partir du point 1 :

$$X = D * \cos(\hat{a}) + \text{«easting»}$$

$$Y = D * \sin(\hat{a}) + \text{«northing»}.$$

D est la distance à partir du coin NE, \hat{a} est l'angle mesuré en degrés à partir de l'axe des x (E).

À partir du point 2 :

$$X = 20 - D * \cos(\hat{a})$$

$$Y = 20 - D * \sin(\hat{a}).$$

APPENDICE B

EXEMPLES DE REPRÉSENTATION D'INFORMATION PAR DES VUES EN 2D½

APPENDICE C

TABLES, GRAPHIQUES ET CARTES DES RÉSULTATS

Tableau C.1	Matrice des variables de terrain et laser de 38 placettes du lac Duparquet, QC	107
Tableau C.2	Volumes déduits du terrain et par le LIDAR pour 8 strates du lac Duparquet, QC	109
Figure C.1	Hauteur de points laser de végétation dans une placette élargie au lac Duparquet, QC	110
Figure C.2	Comparaison par placette entre volume et contenance laser bruts, lac Duparquet, QC	111
Figure C.3	Meilleures relations établies entre volume de terrain et laser au lac Duparquet, QC	112
Figure C.4	Azimut du sol dérivé du LIDAR pour la région d'étude, lac Duparquet, QC	113
Figure C.5	Vue en pseudo-3D d'un modèle numérique de terrain au lac Duparquet, QC	114
Figure C.6	Vue en pseudo-3D d'une orthophoto du lac Duparquet, QC	115
Figure C.7	Rugosité du sol dérivée du LIDAR pour la région d'étude, lac Duparquet, QC	116
Figure C.8	Hypsographie de sol et de végétation d'une placette dérivée du LIDAR, lac Duparquet, QC	117
Figure C.9	Modèle numérique de surface pour la végétation d'un secteur du lac Duparquet, QC	118
Figure C.10	Vue en pseudo-3D du modèle numérique de surface de la végétation, lac Duparquet, QC	119

NOTES

Chapitre I

1. À partir des années soixante, le lancement des premiers satellites pour les applications environnementales a fourni de nouveaux moyens de mesure à distance de phénomènes terrestres, ce qu'on a alors nommé la télédétection. Un aspect fondamental de cette technologie est celui de *résolution*, c'est-à-dire l'aptitude à séparer deux niveaux de signal ou deux points voisins, selon le cas (Bonn et Rochon, 1992). On distinguera la résolution spatiale (influencée par la dimension en x, y, z) de la spectrale (liée à la longueur d'onde) et encore, de la temporelle. La notion de plate-forme (aérienne, spatiale) affecte l'échelle de prise de données et donc, jusqu'à un certain point, la résolution spatiale potentielle. Les satellites permettent entre autres une répétition beaucoup plus fréquente des mesures. On sépare encore les modes d'acquisition de données actifs (où la source du signal capté provient de l'instrument même) des passifs. Dans le mode passif, le capteur ne fait qu'enregistrer un signal émis par la surface terrestre ou la réflexion d'un rayonnement incident de source naturelle (habituellement le soleil). Cette captation plus ou moins fine provient de la séparation, en un nombre variable de plages, de longueurs d'onde produites par réflexion des rayons solaires sur Terre, ce qu'on appelle les bandes spectrales (par exemple, le visible entre 400 et 700 nm ou le proche infrarouge de 700 à 1 500 nm). La réception de ces bandes est assurée par des capteurs sensibles qui emmagasinent le signal transformé sur ruban jusqu'à sa retransmission. On distingue aussi ce type de capteur par sa résolution spatiale, soit aujourd'hui, très basse (1 km ou plus), basse (100 m ou plus), moyenne (10 m ou plus), haute (1 m ou plus) et très haute (moins d'un mètre). Cette dernière catégorie est actuellement réservée aux plates-formes aériennes mais, on commence à voir des satellites de haute résolution (Ikonos) tandis que les trois premiers types correspondent respectivement aux satellites classiques AVHRR, Landsat MSS et SPOT/TM.

2. Le radar est un appareil qui émet des impulsions de type hyperfréquence (de 100 MHz à 100 GHz), qui ont la propriété de pouvoir passer à travers certains matériaux et de rétrodiffuser par écho, principalement selon la conformation géométrique des surfaces, ce qui le rend avantageux pour déduire la topographie (Sabins, 1987).

GLOSSAIRE

- AVHRR. *Advanced Very High Resolution Radiometer* : capteur NOAA ayant une tache au sol de 1 km.
- BNDT. Base nationale de données topographiques du Gouvernement canadien.
- CASI. *Compact Airborne Spectrographic Imager* : imageur à résolution spectrale fine.
- CCT. Centre canadien de télédétection.
- DGPS. *Differential global positioning system*, c'est-à-dire la différence entre la position relative de deux récepteurs GPS.
- DHP. Diamètre à hauteur de poitrine, soit le diamètre d'un tronc à 1,3 m du sol.
- DOP. *Dilution of precision* : un facteur multiplicatif de l'erreur causée par la géométrie existante entre l'utilisateur et les satellites en un temps donné.
- FERLD. Forêt d'Enseignement et de Recherche du Lac Duparquet située en Abitibi(QC).
- INS. *Inertial navigation system* : instrumentation de gestion des axes d'un avion.
- JERS. *Japan Earth Resources Satellite*: scanneur/radar de tache 20m survolant la Terre.
- LAI. *Leaf area index* : indice foliaire exprimant un rapport entre feuillage et terrain.
- LIDAR. *Light detection and ranging* : capteur laser qui sert à mesurer les distances par la détection du temps de retour d'une onde lumineuse émise.
- MRNQ. Ministère des ressources naturelles du Québec : entité responsable de la cartographie forestière au Québec.
- MSS. *Multi Spectral Scanner* : le prédécesseur de Landsat TM, de résolution 52x79 m.
- NDVI. *Normalized difference vegetation index* : combinaison de rouge et infrarouge.
- RMS. *Root mean square* : carré de l'erreur moyenne soit l'écart-type résiduel dans les unités de la mesure.
- SPOT Satellite probatoire pour l'observation de la Terre : plate-forme européenne.
- TM. *Thematic Mapper* : capteur multispectral américain survolant la Terre.
- VM. *Vertical Mapper* : logiciel de modélisation géographique en 2D et pseudo-3D.

RÉFÉRENCES

Note : Les numéros de référence entre parenthèses correspondent au tableau 3.1.

- Abeels, P. F. J. 1995. *Génie forestier*. Paris: Masson. 219 p.
- Ackermann, F. 1999. «Airborne laser scanning - Present status and future expectations». *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*. Vol. 54 p. 64-7.
- Aldred, A. H., et G. M. Bonnor. 1985. *Application of airborne laser to forest surveys*. Chalk River (Ontario): Petawawa National Forest Institute. 62 p. (Référence 148)
- Anon. 2000. *Airborne laser terrain mapping*. <http://www.optech.on.ca/terres1.html>
- Araya, F. 1999. «Uso forestal del SIG». *Geoinformación*. No sept.-oct. 1999 p. 34-8.
- Arp, H., J. C. Griesbach, et J. P. Burns. 1982. «Mapping in tropical forests: a new approach using the laser APR». *Photogrammetric Engineering and remote sensing*. Vol. 48 no 1 p. 91-100. (Référence 107)
- Avery, T. E. 1978. *Forester's guide to aerial photo interpretation*. s. l.: United States Forest Service. 44 p.
- Axelsson, P. 1999. «Processing of laser scanner data - Algorithms and applications». *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*. Vol. 54 no 2-3 p. 138-47.
- Baltsavias, E. P. 1999a. «A comparison between photogrammetry and laser scanning». *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*. Vol. 54 no 2-3 p. 83-94.
- Baltsavias, E. P. 1999b. «Airborne laser scanning - Basic relations and formulas». *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*. Vol. 54 p. 199-214.
- Baltsavias, E. P. 1999c. «Airborne laser scanning - Existing systems and firms and other resources». *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*. Vol. 54 p. 164-98.
- Barrett, E. C., et L. F. Curtis. 1992. *Introduction to environmental remote sensing*. London: Chapman & Hall. 426 p.
- Beucher, S. 1997. «Mieux voir pour mieux gérer». *Franc-vert*. No janvier 1997 p. 24-7
- Bella, I. E. 1970. *Simulation of growth, yield and management of aspen*. Thèse de doctorat, University of British Columbia. 190 p.
- Bérard, J. A., et M. Côté. 1996. *Manuel de foresterie*. Sainte-Foy (Québec): Presses de l'Université Laval. 1428 p.
- Bergeron, Y., B. Harvey, A. Leduc, et S. Gauthier. 1999. «Stratégies d'aménagement forestier qui s'inspirent des perturbations naturelles : considérations à l'échelle du peuplement et de la forêt». *The Forestry Chronicle*. Vol. 75 no 1 p. 55-61.
- Bergeron, Y., A. Bouchard, P. Gangloff, et C. Camiré. 1983. La classification écologique des milieux forestiers de la partie ouest des cantons d'Hébécourt et de Roquemaure, Abitibi, Québec. Sainte-Foy (Québec) : Université Laval. 169 p.

- Berry, J. K. 2000. «Map analysis helps characterize microterrain features». *GEOWorld*. No mars 2000 p. 24-5.
- Blair, J. B., et M. A. Hofton. 1999. «Modeling laser altimeter return waveforms over complex vegetation using high-resolution elevation data». *Geophysical research letters*. Vol. 26 no 16 p. 2509-12.
- Bonn, F., et G. Rochon. 1992. *Précis de télédétection:Principes et méthodes*. Sainte-Foy (Québec): Presses de l'Université du Québec. 485 p.
- Botkin, D. B. 1993. *Forest dynamics, an ecological model*. New York: Oxford University Press. 309 p.
- Burrows, C. J. 1990. *Processes of vegetation change*. London: Unwin Hyman. 551 p.
- Campeau, L. 1993. *Application de la technologie de traitement d'imagerie numérique aux travaux de vérification de la photo-interprétation du couvert végétal*. Ottawa: Service canadien des forêts. 43 p.
- Capellini, V., L. Alparone, G. Galli, P. Langé, A. Mecocci, et L. Minechetti. 1991. «Digital processing of stereo images and 3D reconstruction techniques». *International Journal of Remote sensing*. Vol. 12 no 3 p. 447-90.
- Carpentier, J. P., L. Lacombe, et P. Tardif. 1989. *Modélisation de la croissance et du rendement des peuplements de peuplier faux-tremble au Québec*. Mémoire no 97. Québec: Gouvernement du Québec (MER). 228 p.
- Chapman, H.H., et W.H. Meyer. 1949. *Forest mensuration*. New York: McGraw-Hill. 522 p.
- Chen, J. M., et S. G. Leblanc. 1997. «A four-scale bidirectional reflectance model based on canopy architecture». *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*. Vol. 35 no 5 p 1316-1337.
- Chiao, K. M. 1994. «Use of vegetation indices to estimate forest canopy density». *Decision support-2001*. Bethesda: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. p. 590-2.
- Cochran, W. G. 1972. *Sampling techniques*. New York: J. Wiley. 413 p.
- Conseil canadien des ministres des forêts. 1997. *Critères et indicateurs de l'aménagement durable des forêts au Canada*. Ottawa. Gouvernement du Canada. 51 p.
- Currie, D. H., V. L. Shaw, et F. G. Bercha. 1989. «Integration of laser rangefinder and multispectral video data for forest measurements». *International Geoscience And Remote Sensing Symposium*. P. 2382-4.
- Dagnelie, P., R. Palm, J. Rondeux, et A. Thill. 1985. *Tables de cubage des arbres et des peuplements forestiers*. Gembloux (Belgique) : Presses agronomiques de Gembloux. 146 p.
- Danson, F. M., et S. E. Plummer. 1995. *Advances in environmental remote sensing*. New York: J. Wiley. 184 p.

- Dawkins, H. C. 1963. «Crown diameters: their relation to bole diameter in tropical forest trees». *Commonwealth forestry review*. Vol. 42 no 4 p. 318-33.
- Defourny, P. 1994. «Évaluation et suivi de la végétation ligneuse en région tropicale sèche». Chap. dans *Téledétection de l'environnement dans l'espace francophone*. Sainte-Foy (Québec): Presses de l'université du Québec. P. 247-64.
- Desbuisson, D. 1998. *Interpolation et filtrage des données laser scanner*. <http://www.geocities.com/CapCanaveral/Launchpad/8806/lasc/part1.html>
- Dubrasich, M. E., D. W. Hann, et J. C. Tappeiner II. 1997. «Crown area profiles of forest stands». *Canadian Journal of Forest Research*. Vol. 27 p. 385-92.
- Dufort, J. 2000. Communication personnelle. Montréal: École de technologie supérieure.
- Énergie mines et ressources Canada. 1986. *Téledétection et foresterie*. Ottawa: Gouvernement du Canada. 6 p.
- Fazakas, Z., et M. Nilsson. 1996. «Volume and forest cover estimation over southern Sweden using AVHRR data calibrated with TM data». *International Journal of Remote sensing*. Vol. 17 no 1 p. 1701-9.
- Flood, M., et B. Gutelius. 1997. «Commercial implications of topographic terrain mapping using scanning airborne laser radar». *Photogrammetric Engineering and remote sensing*. Vol. 63 no avril 1997 p. 327-9.
- Flood, M. 2000. «Commercial Development of airborne laser altimetry». *Workshop of ISPRS WG III/2 & III/5 : Mapping surface structure and topography by airborne and spaceborne lasers*. 7-9.11.1999 La Jolla (Californie): Int. Arch. of Photog. & Rem. Sens. Vol. 32 no 3-W14 p. 13-20.
- Fransson, J. E. S., et H. Israelsson. 1999. «Estimation of stem volume in boreal forests using ERS-1 C- and JERS-1 L-band SAR data». *International Journal of Remote sensing*. Vol. 20 no 1 p. 123-37.
- Garvin, J. 1997. *SLA-02 shuttle laser altimeter II*. <http://denali.gsfc.nasa.gov/research/laser/sla02/results.html>
- Gilbert, P. 2000. Communication personnelle. Rouyn-Noranda : ministère des Ressources naturelles du Québec.
- Girard, M. C., et C. M. Girard. 1989. *Téledétection appliquée: zones tempérées et intertropicales*. Paris: Masson. 260 p.
- Gold, M., et T. Roos. 1994. «Surface modelling with guaranteed consistency – an object-based approach». *Notes in computer science*. No 884 p. 70-87.
- Gong, P., G. Biging, et S. M. Lee. 1998. «Photo ecometrics for forest inventory». *Automated interpretation of high spatial resolution digital imagery for forestry*. Victoria: Natural Resources Canada. P. 357-64.
- Goodchild, M. F. 1986. *Spatial autocorrelation*. CATMOG no. 47. Norwich (U. K.). Geo Books. 56 p.

- Graham, S., R. P. Harrison, et C. E. Westell. 1963. *Aspens- Phoenix trees of the Great Lakes region*. Ann Arbor: University of Michigan Press. 272 p.
- Grandell, J., J. Pulliainen, et M. Hallikainen. 1998. «Subpixel land use classification and retrieval of forest stem volume in the boreal forest zone by employing SSM/I data». *Remote sensing of the environment*. Vol. 63 p. 140-54.
- Groupe de recherche en écologie forestière interuniversitaire [GREF-I]. 1997. *Forêt d'enseignement et de recherche du lac Duparquet*. Montréal: GREF-I. 43 p.
- Groupe de recherche en écologie forestière interuniversitaire [GREF-I]. 1999. *Plan général d'aménagement*. Montréal: GREF-I. 144 p.
- Harding, D.J., J. B. Blair, E. Rodriguez, et T. Michel. 1995. «Airborne laser altimetry and interferometric SAR measurements of canopy structure and sub-canopy topography in the Pacific Northwest». *International Geoscience And Remote Sensing Symposium*. P. 22-4
- Harlow, W. M., et E. S. Harrar. 1968. *Textbook of dendrology*. New York: McGraw-Hill. 512 p.
- Harvey, B. 2000. Communication personnelle. Rouyn-Noranda : Forêt d'Enseignement et de Recherche du Lac Duparquet.
- Hecht, J. 1996. «LIDAR instrument profiles forest canopy». *Laser focus world*. No novembre 1996 p. 47-50.
- Hosie, R. C. 1978. *Arbres indigènes du Canada*. Montréal: Fides. 389 p.
- Huang, S., et S. J. Titus. 1994. «An age-independent individual tree height prediction model for boreal spruce-aspen stands in Alberta». *Canadian Journal of Forest Research*. Vol. 24 p. 1295-301.
- Huising, E. J., et L. M. Gomes Pereira. 1998. «Errors and accuracy estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic applications». *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*. Vol. 53 p. 245-61.
- Hunsaker, C., R. A. Nisbet, D. Lam, J. A. Browder, W. L. Baker, M. G. Turner, et D. B. Botkin. 1993. «Spatial models of ecological systems and processes: the role of GIS». Chap. 22 dans *Environmental modeling with GIS*. New York: Oxford University Press. P. 248-263.
- Jaton, A., et K. P. B Thomson. 1994. «Les applications du radar en milieu forestier». Chap. dans *Téledétection de l'environnement dans l'espace francophone*. Sainte-Foy (québec): Presses de l'université du Québec. P. 229-46.
- Jobidon, M. 1995. *Autécologie de quelques espèces de compétition d'importance pour la régénération forestière au Québec*. Mémoire no 117. Québec: Gouvernement du Québec (Ministère des Ressources naturelles du Québec). 180 p.
- Johnson, A. F., P. M. Woodard, et S. J. Titus. 1990. «Lodgepole pine and white spruce crown fuel weights predicted from DBH». *Forestry chronicle*. No décembre 1990 p. 596-9.

- Kalshoven, J. E., et P. W. Dabney. 1993. «Airborne laser polarimetry measurements during the forest ecosystems dynamics experiment». *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*. Vol. 31 p. 897-9.
- Kmitta, J. 2000. «2000, elevating the standards». *Business Geographics*. No janvier 2000 p. 27.
- Kneeshaw, D. D., et Y. Bergeron. 1998. «Canopy gap characteristics and tree replacement in the southeastern boreal forest». *Ecology*. Vol. 79 no 3 p. 783-94.
- Koesmarno, H. K., E. Mason, et A. Whyte. 1994. «Object-oriented software for modelling growth and size-class distance of tree crops». *Decision support-2001*. Bethesda: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. P. 427.
- Kovats, M. 1997. «A large scale aerial photographic technique for measuring tree heights on long-term forest installations». *Photogrammetric Engineering and remote sensing*. Vol. 63 no 6 p. 741-7.
- Krabill, W., J. G. Collins, L. E. Link, R. N. Swift, et M. L. Butler. 1984. «Airborne laser topographic mapping results». *Photogrammetric Engineering and remote sensing*. Vol. 50 no 6 p. 685-94. (Référence 105)
- Kraus, K., et N. Pfeifer. 1998. «Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data». *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*. Vol. 53 p. 193-203. (Référence 58)
- Kraus, K., et W. Rieger. 1999. *Processing of laser scanning data for wooded areas*. <http://www.ipf.tuwien.ac.at> (Référence 120)
- Lefsky, M. A., W. B. Cohen, S. A. Acker, T. A. Spies, G. Parker, et D. J. Harding. 1998. «LIDAR remote sensing of forest canopy structure and related biophysical parameters at H. J. Andrews experimental forest». *International Geoscience And Remote Sensing Symposium*. P. 1252-4. (Référence 67)
- Lefsky, M. A., D. J. Harding, W. B. Cohen, G. Parker, et H. H. Shugart. 1999. «Surface lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of Eastern Maryland, USA». *Remote sensing of the environment*. Vol. 67 p. 83-98. (Référence 128)
- Lefsky, M. A., W. B. Cohen, A. Hudak, S. A. Acker, et J. L. Ohmann. 2000. «Integration of lidar, Landsat ETM+ and forest inventory data for regional forest mapping». *Workshop of ISPRS WG III/2 & III/5 : Mapping surface structure and topography by airborne and spaceborne lasers*. 7-9.11.1999 La Jolla (Californie): Int. Arch. of Photog. & Rem. Sens. Vol. 32 no 3-W14 p. 23-30. (Référence 75)
- Lieffers, V. J., K. J. Stadt, et S. Navratil. 1996. «Age structure and growth of understory white spruce under aspen». *Canadian Journal of Forest Research*. Vol. 26 p. 1002-7.
- Lillesand, T. M., et R. W. Kiefer. 1987. *Remote sensing and image interpretation*. New York: J. Wiley. 721 p.
- Lin, C. S. 1997. «Waveform sampling LIDAR applications in complex terrain». *International Journal of Remote sensing*. Vol. 18 no 10 p. 2087-104.

- Lowell, K. 1997. *Nouvelle méthode pour estimer le volume local à partir de photographies à grande échelle et de données de terrain*. Ste-Foy (Québec): Université Laval. 63 p.
- Lyzenga, D. R. 1985. «Shallow-water bathymetry using combined LIDAR and passive multispectral scanner data». *International Journal of Remote sensing*. Vol. 6 no 1 p.115-25.
- Maclean, G. A., et G. L. Martin. 1984. «Merchantable timber volume estimation using cross-sectional photogrammetric and densitometric methods». *Canadian Journal of Forest Research*. Vol. 12 p. 803-10.
- Maclean, G. A., et W. B. Krabill. 1986. «Merchantable timber volume estimation using an airborne LIDAR system». *Canadian Journal of Forest Research*. Vol. 14 p. 7-18. (Référence 110)
- Magnussen, S., et P. Boudewyn. 1998. «Derivations of stand heights from airborne laser scanner data with canopy-based quantile estimators». *Canadian Journal of Forest Research*. Vol. 28 p. 1016-31. (Référence 11)
- Magnussen, S., P. Eggermont, et V. N. LaRiccia. 1999. «Recovering tree heights from airborne laser scanner data». *Forest Science*. Vol. 45 No. 3 p. 407-22. (Référence 68)
- Means, J. E., A. S. Acker, et D. J. Harding. 1999. «Use of large-footprint scanning airborne lidar to estimate forest characteristics in the western cascades of Oregon». *Remote sensing of the environment*. Vol. 67 p. 288-308. (Référence 69)
- Means, J. E., et J. Swenson. 1999. *Capital forest LIDAR study*. http://www.fsl.orst.edu/~means/lidar/cap_for/capfor1.html (Référence 131)
- Measures, M. E. 1984. *Laser remote sensing*. New York: J. Wiley. 510 p.
- Million, C. 1990. «Utilisation des mesures saisies en vol en aérotriangulation: GPS, capteur de pression, télémètre-laser». *Bulletin de la société française de photogrammétrie et télédétection*. No 118 p. 6-19.
- Ministère des Ressources naturelles du Québec [MRNQ]. 1984. *Normes d'inventaire forestier*. Québec: Gouvernement du Québec. 177 p.
- Ministère des Ressources naturelles du Québec [MRNQ]. 1991. *Normes de prise de données et de vérification*. Québec: Gouvernement du Québec. 180 p.
- Ministère des Ressources naturelles du Québec [MRNQ], Direction des programmes forestiers. 1998. *Manuel d'aménagement forestier*. Charlesbourg. Gouvernement du Québec. 122 p.
- Moreau, R., et L. M. A. Jeudy. 1986. «Profilomètre laser-inertiel: un essai qualitatif en terrain boisé». *Le géomètre canadien*. Vol. 40 no 1 p. 23-8.
- Morton, R. T., S. J. Titus, G. M. Bonnor, et T. I. Grabowski. 1990. «An assessment of white spruce tree volume equations in Canada». *Forestry chronicle*. No décembre 1990 p. 600-5.
- Muhairwe, C. K., V. M. Lemay, et A. Kozak. 1994. «Effects of adding tree, stand, and site variables to Kozak's variable-exponent taper equation». *Canadian Journal of Forest Research*. Vol. 24 p. 252-9.

- Murtagh, J. 1999. «Laser altimetry and flood risk management». *GIM*. Vol. 13 no 10 3 p.
- Naesset, E. 1997a. «Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data». *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*. Vol. 52 p. 49-56. (Référence 13)
- Naesset, E. 1997b. «Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data». *Remote sensing of the environment*. Vol. 61 p. 246-53. (Référence 14)
- Nelson, R. 1984. «Determining forest canopy characteristics using airborne laser data». *Remote sensing of the environment*. Vol. 15 p. 201-12. (Référence 53)
- Nelson, R., W. Krabill, et J. Tonelli. 1988a. «Estimating forest biomass and volume using airborne laser data». *Remote sensing of the environment*. Vol. 24 p. 247-67. (Référence 54)
- Nelson, R., R. N. Swift, et W. Krabill. 1988b. «Using airborne lasers to estimate forest canopy and stand characteristics». *Journal of forestry*. No octobre 1988 p. 31-8. (Référence 136)
- Nelson, R. 1997. «Modeling forest canopy heights: the effects of canopy shape». *Remote sensing of the environment*. Vol. 60 p. 327-34. (Référence 72)
- Nelson, R., R. Oderwald, et T. G. Gregoire. 1997. «Separating the ground and airborne laser sampling phases to estimate tropical forest basal area, volume and biomass». *Remote sensing of the environment*. Vol. 60 p. 311-26. (Référence 7)
- Nelson, R., J. E. Kalshoven, et D. Harding. 1998. «Attempts to estimate LAI using airborne flashlamps and lasers». *International Geoscience And Remote Sensing Symposium*. P. 1562-4.
- Nilsson, M. 1996. «Estimation of tree heights and stand volume using an airborne lidar system». *Remote sensing of the environment*. Vol. 56 p. 1-7. (Référence 48)
- Nisset, R. A., et D. B. Botkin. 1993. «Integrating a forest growth model with a GIS». Chap. 23 dans *Environmental modeling with GIS*. New York: Oxford University Press. P. 265-269.
- NOAA 2000. *Airborne LIDAR assessment of coastal erosion project*. <http://www.csc.noaa.gov/crs/alace>
- O'Brien, S. T., S. P. Hubbell, P. Spiro, R. Condit, et R. B. Foster. 1995. «Diameter, height, crown, and age relationships in eight neotropical tree species». *Ecology*. Vol. 76 no 6 p. 1926-39.
- Odum, E. P. 1986. *Basic ecology*. USA: CBS College Publishing. 422 p.
- Orland, B., T. C. Daniel, et A. Thorn. 1997. «Smartforest: Visualizing the effects of forest harvest practices». *11th annual symposium on GIS*. Vancouver: P. 220-5.
- Pachepsky, Y. A., J. C. Ritchie, et D. Gimenez. 1997. «Fractal modeling of airborne laser altimetry data». *Remote sensing of the environment*. Vol. 61 p. 150-61.

- Paré, D., et Y. Bergeron. 1995. «Above-ground biomass accumulation along a 230-year chronosequence in the southern portion of the Canadian boreal forest». *Journal of ecology*. Vol. 83 p. 1001-7.
- Parent, S. 1990. *Dictionnaire des sciences de l'environnement*. Laprairie: Broquet. 748 p.
- Payandeh, B. 1990. «Equations describing attributes of major tree species in North Central Ontario». *Forest ecology and management*. Vol. 36 p. 245-52.
- Perron, J. Y. 1985. *Tarif de cubage général*. Québec: Gouvernement du Québec (Ministère des Ressources naturelles du Québec). 59 p.
- Philip, M. S. 1994. *Measuring trees and forests*. 2e éd. Wallingford (U. K.): CAB International. 310 p.
- Pielou, E. C. 1988. *The world of northern evergreens*. Ithaca: Comstock. 174 p.
- Ranson, K. J., G. Sun, J. F. Weishampel, et R. G. Knox. 1997. «Forest biomass from combined ecosystem and radar backscatter modeling». *Remote sensing of the environment*. Vol. 59 p. 118-33.
- Rieger, W., O. Eckmüllner, H. Müllner, et T. Reiter. 2000. «Laser-scanning for the derivation of forest stand parameters». *Workshop of ISPRS WG III/2 & III/5 : Mapping surface structure and topography by airborne and spaceborne lasers*. 7-9.11.1999 La Jolla (Californie): Int. Arch. of Photog. & Rem. Sens. Vol. 32 no 3-W14 p. 193-200. (Référence 55)
- Ritchie, J. C., J. H. Everitt, D. E. Escobar, T. J. Jackson, et M. R. Davis. 1992. «Airborne laser measurements of rangeland canopy cover and distribution». *Journal of Range Management*. Vol. 48 p. 189-93. (Référence 83)
- Ritchie, J. C., M. Menenti, et M. A. Weltz. 1996. «Measurements of land surface features using an airborne laser altimeter: the HAPEX-Sahel experiment». *International Journal of Remote sensing*. Vol. 17 no 18 p. 3705-24. (Référence 9)
- Rondeux, J. 1993. *La mesure des arbres et des peuplements forestiers*. Gembloux (Belgique): Presses agronomiques de Gembloux. 521 p.
- Sabins, F. F. 1987. *Remote sensing, principles and interpretation*. New York: W. H. Freeman. 449 p.
- Santerre, R., et S. Bourgon. 1999. «6 000 ans de géomatique». *Géomatique*. No 4 p. 6-14
- Scherrer, B. 1984. *Biostatistique*. Chicoutimi: Gaëtan Morin. 850 p.
- Schreier, H., J. Loughheed, J. R. Gibson, et J. Russell. 1984. «Calibrating an airborne laser profiling system». *Photogrammetric Engineering and remote sensing*. Vol. 50 no 11 p. 1591-8. (Référence 108)
- Schreier, H., J. Loughheed, C. Tucker, et D. Leckie. 1985. «Automated measurements of terrain reflection and height variations using an airborne infrared laser system». *International Journal of Remote sensing*. Vol. 6 no 1 p. 101-13. (Référence 100)
- Service canadien des forêts. 1991. *Aspen management for the 21st century*. Ottawa: Ressources naturelles Canada. 174 p.

- Seshamani, R. 1993. «A satellite-borne laser altimeter for digital terrain modelling». *International Journal of Remote sensing*. Vol. 14 no 17 p. 3133-5.
- Sicotte, V. 1999. «Zoom sur les forêts». *Québec Science*. No avril 1999 p. 19-21.
- Smith, G., et L. M. H. Ulander 2000. «A model relating VHF backscatter to stem volume of boreal forest». *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*. Vol. 38 no 2 p. 728-38.
- Smith, H. G. 1963. «Analysis of crown development». *Commonwealth forestry review*. Vol. 42 no 4 p. 27-32.
- Spurr, S.H. 1960. *Photogrammetry and photo-interpretation*. 2^e éd. New York :Ronald Press. 472 p.
- St-Onge, B., M. Couture, et S. Alleaume. 1998. *Forest stand structure mapping using a species-controlled textural approach*.
<http://www.unites.uqam.ca/dgeo/stonge/victoria98/paper.html>
- St-Onge, B. 2000. «Estimating individual tree heights of the boreal forest using airborne laser altimetry and digital videography». *Workshop of ISPRS WG III/2 & III/5 : Mapping surface structure and topography by airborne and spaceborne lasers*. 7-9.11.1999 La Jolla (Californie): Int. Arch. of Photog. & Rem. Sens. Vol. 32 no 3-W14 p. 179-184. (Référence 28)
- Stiell, W. M. 1969. *Crown development in white spruce plantations*. Toronto: Gouvernement de l'Ontario. O. D. C. No 1249. 12 p.
- Sutton, R. F. 1973. *Histoire naturelle de l'épinette blanche*. Ottawa: Direction générale des forêts. 57 p.
- Tanaka, T., J. Yamaguchi, et Y. Takeda. 1998. «Measurement of forest canopy structure with a laser plane range-finding method». *Agricultural and forest meteorology*. Vol. 91 no 3 p. 149-60.
- Toth, C. K., et A. Krupnik. 1996. «Concept, implementation, and results of an automatic aerotriangulation system». *Photogrammetric Engineering and remote sensing*. Vol. 62 no 6 p. 711-7.
- Upton, C., et S. Bass. 1996. *The forest certification handbook*. Delray Beach (Floride). St-Lucie Press. 218 p.
- Vanderbilt, V. C., L. F. Silva, et M. E. Bauer. 1990. «Canopy architecture measured with a laser». *Applied optics*. Vol. 29 no 1 p. 99-107.
- Villemaire, P., J. M. G. Morasse, et P. A. Gagnon. 1998. *Utilisation du DVP pour mesurer la hauteur de peuplements forestiers sur photographies aériennes d'échelle moyenne*. Ottawa: Ressources naturelles Canada. 34 p.
- Watt, S. B. éd. 1983. *Forestry handbook for British Columbia*. Vancouver: University of British Columbia. 611 p.
- Wehr, A., et U. Lohr. 1999a. «Airborne laser scanning - An introduction and overview». *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*. Vol. 54 no 2-3 p. 68-82.

- Wehr, A., et U. Lohr. 1999b. «Theme issues on airborne laser scanning». *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*. Vol. 54 no 2-3 p. 61-3.
- Weishampel, J. F., J. B. Blair, R. G. Knox, R. Dubayah, et D. B. Clark. 2000. «Volumetric lidar return from an old-growth tropical rainforest canopy». *International Journal of Remote sensing*. Vol. 21 no 2 p. 409-15.
- Weltz, M. A., J. C. Ritchie, et H. D. Fox. 1994. «Comparison of laser and field measurements of vegetation height and canopy cover». *Water resources research*. Vol. 30 no 5 p. 1311-9. (Référence 76)
- Wenger, K. F. 1984. *Forestry handbook*. 2e éd. New York: J. Wiley. 1335 p.
- Williams, M. S., et H. T. Schreuder. 2000. «Guidelines for choosing volume equations in the presence of error in height». *Canadian Journal of Forest Research*. Vol. 30 p. 306-10.
- Wulder, M. 1998. «Optical remote-sensing techniques for the assessment of forest inventory and biophysical parameters». *Progress in physical geography*. Vol. 22 no 4 p. 449-76.
- Wynne, R. H., et D. B. Carter. 1997. «Will remote sensing live up to its promise for forest management? ». *Journal of forestry*. No octobre 1997 p. 23-6.
- Young, R.A., et R.L. Gliese. 1990. *Introduction to forest science*. New York: J. Wiley. 586 p.
- Zarnovican, R. 1982. «Examen de quelques relations allométriques chez le sapin baumier et l'épinette blanche». *Canadian Journal of Forest Research*. Vol. 12 p. 171-80.

BIBLIOGRAPHIE SÉLECTIVE COMPLÉMENTAIRE

- Blair, J. B., D. L. Rabine, et M. A. Hofton. 1999. «The laser vegetation imaging sensor: a medium-altitude, digitisation-only, airborne laser altimeter for mapping vegetation and topography». *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*. Vol. 54 p. 115-22.
- Chartrand, L. 1999. «Razzia sur la forêt». *L'Actualité*. No décembre 1999. p. 30-47.
- Couture, M. 1999. *Développement d'une méthode de cartographie forestière à partir d'images de résolution métrique*. Montréal: UQAM. 23 p. (rapport interne).
- Franklin, S. E., R. J. Hall, et G. S. Ghitter. 1994. «Satellite remote sensing of white spruce understory in deciduous and mixedwood stands». *Decision support-2001*. Bethesda: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. P. 239-47.
- Harding, D. J. 1998. «Airborne LIDAR observations of canopy structure at the BOREAS tower flux sites». *International Geoscience And Remote Sensing Symposium*. P. 1550-2.
- Hyppä, J., et M. Hallikainen. 1996. «Applicability of airborne profiling radar to forest inventory». *Remote sensing of the environment*. Vol. 57 p. 39-57.
- Payette, S. 1977. «Succession écologique des forêts d'épinette blanche et fluctuations climatiques». *Journal de botanique*. P. 1394-402.
- Peña, O., et A.-L. Sanguin. 1986. *Concepts et méthodes de la géographie*. Montréal: Guérin. 177 p.
- St-Onge, B. 1994. *Apport de la texture des images numériques de haute résolution à la cartographie forestière automatisée*. Thèse de doctorat, Université de Montréal. 251 p.
- Timoney, K. P. et A. L. Robinson. 1996. «Old-growth white spruce and balsam poplar forests of the Peace river lowlands, Wood Buffalo National Park, Canada: development, structure and diversity». *Forest ecology and management*. Vol. 81 p. 179-96.
- Wang, G. G., et K. Klinka. 1995. «Site-specific height curves for white spruce stands based on stem analysis and site classification». *Annales des sciences forestières*. Vol. 52 p. 607-18.

