

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

EFFETS DES TAILLES DE DÉGAGEMENT DES RÉSEAUX
ÉLECTRIQUES SUR LA COLONISATION DE L'ESPACE PAR LES
ARBRES, DÉVELOPPEMENT ET MISE EN APPLICATION D'UNE
MÉTHODE D'ANALYSE DE DONNÉES T-LIDAR

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN BIOLOGIE

PAR

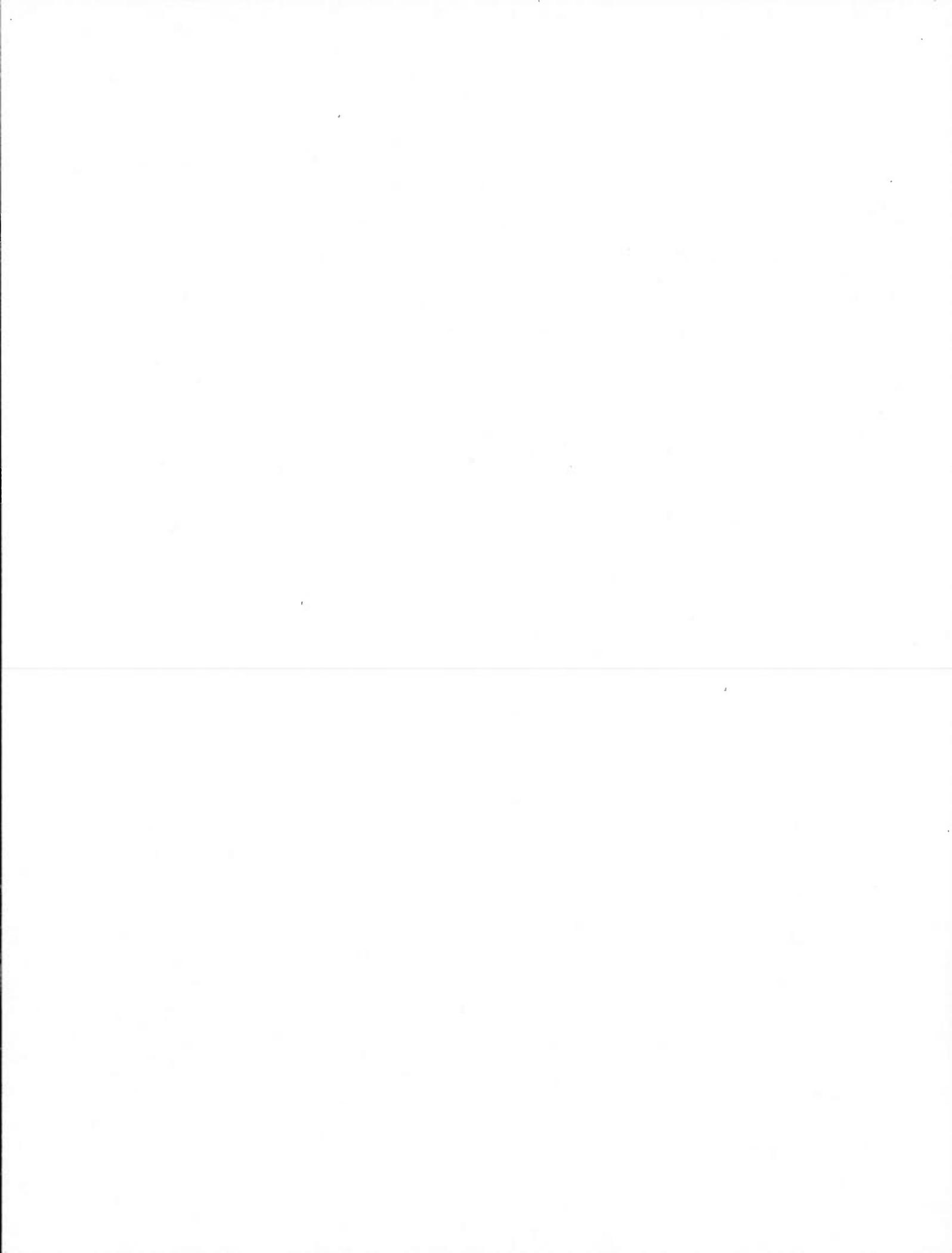
BASTIEN LECIGNE

JUIN 2013

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

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



REMERCIEMENTS

Je tiens d'abord à remercier mon directeur, Sylvain Delagrange, et mon co-directeur, Christian Messier, pour leur soutien, les nombreuses idées qu'ils ont su faire germer et la confiance qu'ils m'ont témoignée. Merci messieurs de m'avoir accueilli aussi chaleureusement dans vos équipes respectives. Vous le savez, réaliser une maîtrise n'est pas toujours une entreprise facile, les moments de doutes et de remise en question sont fréquents, mais vous avez toujours su me faire repartir de l'avant.

Je remercie ensuite les équipes de l'iqaff, aujourd'hui devenu ISFORT, et celle de l'UQAM pour leur aide précieuse. Je remercie tout particulièrement Sara, qui a toujours trouvé une solution aux plus périlleux des problèmes administratifs, et Pascal pour son assistance informatique. Merci à vous pour votre gentillesse. Je tiens également à remercier Richard Fournier pour son aide précieuse sans laquelle cette étude n'aurait pas été possible.

Je remercie ensuite tous mes amis, qui sont bien trop nombreux pour tous les énumérer, mais qui ont chacun fait en sorte que ces années sont passées comme dans un rêve. Merci à tous ceux qui sont passés à « *la commune* », aux « *voisins* » et à leurs successuers, aux habitants du 8098 rue de Gaspé, aux « *lumberjack* » et à tous les autres. Merci tout particulièrement aux étudiants du « *labo Messier* » et du CEF pour leur gentillesse, leur humour, leur simplicité, leur ouverture d'esprit et les quelque litres de bières consommés au Bénélux. À vous tous un immense merci pour ces très beaux moments passés en votre compagnie.

Je remercie aussi ma Petite Fée d'avoir fait en sorte que l'amour croise ma route. J'espère que tous ces beaux moments continueront encore longtemps.

Je remercie enfin tous ceux qui sont restés en France. Mes amis avec qui il est si

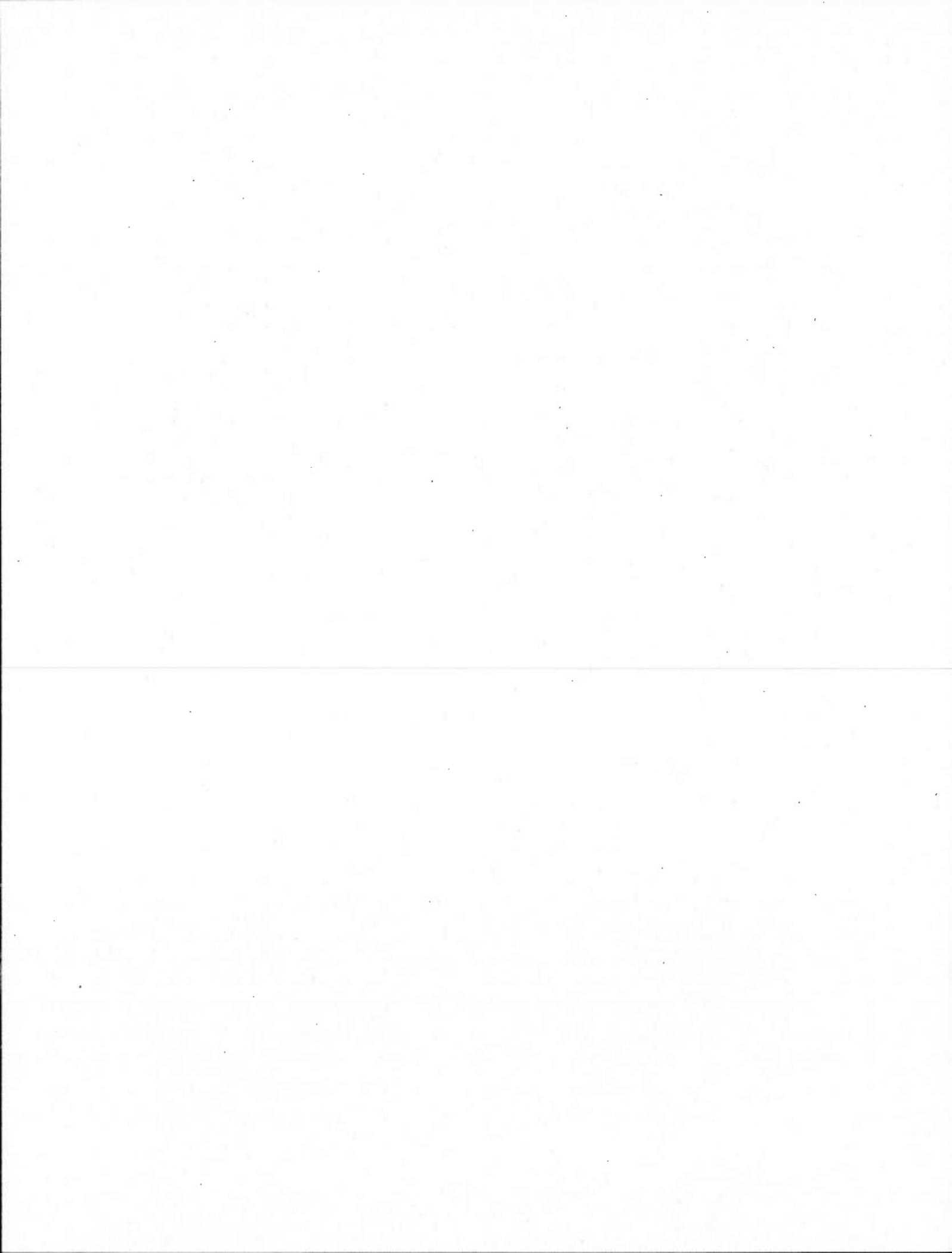
agréable de se retrouver après de longs moments d'absence, et surtout ma famille. Je sais qu'il n'est pas facile de laisser partir ceux qu'on aime, mais, croyez-moi, ce n'est pas facile non plus de vous quitter. Malgré tout la vie suit son cours et nous restons une famille en dépit de l'océan qui nous sépare... Mes grands-parents, mes oncles et tantes, mes cousins ; je ne vous ai pas oubliés un seul instant. Papa, Maman et Jah merci de toujours avoir été là, prêt à m'aider autant que possible malgré la distance et d'avoir fait de moi ce que je suis devenu. Je n'y serai pas arrivé sans vous... À vous tous je vous aime.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES TABLEAUX	ix
RÉSUMÉ	xi
INTRODUCTION	1
0.1 L'architecture des arbres	1
0.2 La plasticité de la forme des arbres : réactions aux contraintes du milieu . .	2
0.2.1 Les répétitions non séquentielles	2
0.2.2 Comment la lumière modèle les arbres	2
0.2.3 La taille : une nouvelle contrainte	5
0.2.4 Cas particulier des tailles de dégagement des réseaux électriques . .	6
0.3 Théories de modélisation de la croissance des plantes : vers une compréhension simplifiée des arbres	9
0.4 État des connaissances sur la télédétection	11
0.4.1 Le T-LiDAR	11
0.4.2 L'utilisation du LiDAR terrestre pour la description d'arbres individuels	12
0.4.3 La voxelisation : une voie d'étude des données LiDAR	14
0.5 Objectifs et hypothèses	14
CHAPITRE I	
VOXR, UN PACKAGE DÉDIÉ À L'ANALYSE DE SCÈNES LIDAR DANS R	17
1.1 Introduction et contexte de développement	18
1.2 Prise de données et prétraitement	20
1.3 Description de la méthode	21
1.3.1 Méthode de voxelisation	21
1.3.2 Traitements des nuages de voxels	22
1.3.3 Visualisation des résultats	23
1.4 Mise en application et discussion sur les algorithmes	23

1.4.1	Voxelisation des nuages de points	23
1.4.2	Dispersion tridimensionnelle des voxels	25
1.4.3	Densité de voxels projetés	29
1.4.4	Comparaison entre deux scènes LiDAR	32
1.5	Discussion sur le choix de la résolution des voxels	32
1.6	Discussion générale	36
CHAPITRE II		
EFFETS DES TAILLES DE DÉGAGEMENT DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES		
SUR L'EXPLORATION DE L'ESPACE PAR LA COURONNE D'ÉRABLES		
ARGENTÉS (ACER SACCHARINUM) À PARTIR DE DONNÉES T-LIDAR .		
2.1	Introduction	41
2.2	Matériel et méthode	43
2.3	Résultats	45
2.3.1	Morphologie de la couronne	45
2.3.2	Pertes induites par la taille et recroissance	50
2.3.3	Implications sur le volume d'espace exploré par la couronne	52
2.4	Discussion	53
CONCLUSION		
61		
APPENDICE A		
GLOSSAIRE DES TERMES D'ARCHITECTURE DES ARBRES		
65		
APPENDICE B		
MANUEL D'UTILISATION DES FONCTIONS DE LA LIBRAIRIE VOXR . .		
71		
B.1	vox (data, res, plot3D)	71
B.2	point.distance.dispersion (data, point)	71
B.3	axis.distance.dispersion (data, axis)	72
B.4	axis.angle.dispersion (data, axis, projected)	72
B.5	project (data, dim)	73
B.6	levels (datas, method, levels)	73
B.7	surface (data, levels, method, res, porportion)	74
B.8	raster.projection (data, res, method, levels, title, colors, contour, classlegend, surf, dim)	75

B.9 substract.objects (data1, data2, res, nvox.reaserch)	76
B.10 objets.reconuition (data,dist.research)	77
BIBLIOGRAPHIE	79



LISTE DES FIGURES

Figure	Page
<p>0.1 Schéma proposé par Hallé (1986) illustrant l'adaptation aux modifications de condition lumineuse de l'environnement par réitération adaptative. (a) : un arbre unitaire dépourvu de la capacité de réitération; (b) : un arbre colonial capable de réitérer. (i) l'arbre dans son environnement initial, (ii) une trouée apparaît à proximité de l'arbre, (iii) l'arbre réagit.</p>	3
<p>0.2 Photographies illustrant la mise en place de réitérations traumatiques suite à des tailles intensives. (a) photographie de réitérations traumatiques sur un Frêne d'Amérique (<i>Fraxinus americana</i>); (b) prolifération de réitérations traumatiques sur un Érable argenté (<i>Acer saccharinum</i>).</p>	3
<p>0.3 Schéma des préconisations de dégagements critiques imposées par Hydro-Québec autour des réseaux électriques. La zone grise représente le volume à l'intérieur duquel aucun élément de végétation ne doit être présent; à gauche : autour des lignes de distribution basse tension; à droite : autour des lignes de distribution moyenne tension (Hydro-Québec, 2009).</p>	7
<p>0.4 Les quatre cas de figures menant au dégagement des réseaux électriques. (a) pas de fils; (b) fils verticaux situés latéralement; (c) fils verticaux situés au dessus de l'arbre; (d) fils verticaux et horizontaux situés au dessus de l'arbre (Millet et Bouchard, 2003).</p>	8
<p>1.1 Exemple d'un nuage de points brut (a) voxelisé à 1 m (b), 0.2 m (c) et 0.1 m.</p>	24
<p>1.2 Exemple d'utilisation de la fonction « point.distance.dispersion ». (a) les coordonnées du point de référence sont définies comme étant la moyenne des coordonnées de tous les voxels. (b) les coordonnées du point de référence sont 0,0,0. Les sphères bleues représentent le point de référence. Pour (a) et (b) les graphiques de densité des distances sont tracés à droite.</p>	26
<p>1.3 Exemples d'utilisation de la fonction « axis.distance.dispersion ». (a) l'axe de référence est l'axe des z. (b) l'axe de référence est l'axe des y. L'axe de référence est représenté en bleu. Pour (a) et (b) les graphiques de densité des distances sont tracés à droite.</p>	27

- 1.4 Exemples d'utilisation de la fonction « axis.angle.dispersion ». Dans les deux cas l'axe de référence est l'axe de y, représenté en bleu. (a) l'angle des voxels est calculé sans projection. En (b) l'angle est calculé avec projection dans le plan x,y. Pour (a) et (b) les graphiques de densité des distances sont traces en bas pour (a) et à droite pour (b). 28
- 1.5 Exemples d'utilisation de la fonction « project », visualisé à l'aide de la fonction « raster.projection » pour la projection d'arbres. (a) nuages bruts vus perpendiculairement au plan de projection. (b) à (g) projection dans le plan x,y. (h) à (j) projection dans le plan x,z. (b), (e), (h) et (i) nombre de voxels (nvox). (c) et (f) nombre de points (npts). (d), (g) et (j) rotio npts/nvox. (b), (c), (d) et (i) classes définies par pourcentages (0.2). (e), (f), (g) et (h) classes définies par quintiles. La légende des classes de densité est présentée en haut à gauche. 30
- 1.6 Exemples d'utilisation de la fonction « project », visualisée à l'aide de la fonction « raster.projection » pour la projection de la plantation. (a) nuage de points brut, en haut vu de 3/4, en bas vue de face. (b) projection du nombre de points (npts). (c) projection du nombre de voxels (nvox) d'une résolution r = 0.1. (d) nvox, r = 0.2. (e) nvox, r = 0.4. La légende des classes de densité est présentée en haut à gauche. 31
- 1.7 Exemples d'utilisation de la fonction « subtract.objects ». (a), (b) et (c) soustraction d'un arbre après taille à ce même arbre avant taille. (d), (e) et (f) soustraction d'un arbre à ce même arbre après une année de croissance. (a) dist.reaserch = 0.5, (b) dist.reaserch = 10. (c) similaire (b) remplacé sur l'arbre après taille. (d) dist.reaserch = 5, (e) dist.reaserch = 7, (f) similaire à (e) remplacé sur l'arbre avant une année de croissance. 33
- 1.8 Exemple de l'utilisation de la fonction « objects.reconuission ». (a) nuage de points brut issu de la soustraction d'un arbre avant et après taille. (b) similaire à (a) après reconnaissance des objets, distance de recherche (fac) de 0.06. (c) nuage de point brut de la soustraction d'un arbre à ce même arbre après une année de croissance. (d) similaire à (c) après reconnaissance des objets, distance de recherche (fac) de 0.1. (e) nuage de points d'une partie de la plantation sans sol. (f) similaire à (e) après reconnaissance des objets, distance de recherche (fac) de 0.2. 34
- 1.9 Graphique du nombre de voxels et du volume calculé en fonction de la résolution ajustés par une courbe « spline » de tendance. Le nombre de voxels est représenté par des cercles noirs ajustés et le volume calculé par des cercles gris. La droite verticale représente la définition minimale du nuage de points. 36

1.10	Le nuage de point LiDAR d'une branche isolée (à droite), au centre ce même nuage de points voxelisé à une résolution de 0.2 m et à droite à 0.05 m. Les ellipses rouges représentent des zones d'occlusion et les ellipses bleues ces mêmes zones d'occlusion compensées par la voxelisation.	37
2.1	Découpages polynomiaux réalisés sur les arbres t0, tt et te. En bleu : distribution de fréquences du nombre de voxels en fonction de la largeur de l'arbre (X). En vert : ajustement du modèle de découpage polynomial. En rouge les distributions ajustées. Les triangles rouges sur l'axe des X indiquent la position de la médiane des distributions ajustées; de gauche à droite : D1, D2, D3.	48
2.2	Graphiques de densité des distributions des voxels en fonction de leur distance au centre de la couronne pour les catégories t0, tt et te.	49
2.3	Graphiques de densité de la saturation de l'espace des projections des nuages de voxels dans le plan xy pour les catégories t0, tt et te.	50
2.4	Graphiques de densité de la distance au centre de la couronne de la croissance des arbres témoins (C-te), de la croissance suivant la taille des arbres taillés (C-tt) et des pertes induites par la taille (P-t0).	52
2.5	Boxplot du rapport Volume / DHP pour les cinq catégories d'arbres, de gauche à droite : témoins (te), témoins après une année de croissance (te+1), taillés avant taille (t0), taillés après taille (tt) et taillés après une année de croissance (tt+1).	54
2.6	Graphiques de synthèse du modèle de croissance théorique prenant part à un cycle de taille. La légende est indiquée dans le graphique.	57
2.7	Schéma de synthèse du système arbres / tailles unidirectionnelles en V. La légende est indiquée dans le graphique.	58

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
2.1 Informations sur les arbres et les indicateurs calculés	46
2.2 Pertes et croissance des arbres taillés et témoins	53

RÉSUMÉ

À Montréal, de nombreux arbres de rue sont en conflit avec les réseaux électriques. D'après les estimations d'Hydro-Québec, ils sont en effet responsables d'environ 11% des coupures de courant. Afin de réduire les risques causés par les arbres sur ces réseaux, le distributeur a mis au point des normes définissant les distances minimales en deçà desquelles la végétation ne doit pas s'approcher des conducteurs. L'application de ces normes prend la forme de cycles de taille visant à supprimer les branches pouvant menacer l'intégrité du réseau électrique. Ces interventions d'émondage peuvent prendre différentes formes et notamment celle de tailles unidirectionnelles en « V », visant à dégager un espace dans le centre de la couronne des arbres dans lequel passent les fils électriques. Dans de très nombreux cas, la réaction des arbres à ces tailles oblige le distributeur à mettre en place des cycles courts, 3 à 4 ans, très onéreux. Plusieurs études démontrent d'ailleurs un manque d'efficacité de ces tailles, souvent réalisées de façon génériques et sous les auspices d'un manque de compréhension globale de leurs effets sur les arbres. La présente étude a pour objectif de mettre en lumière les effets de ces tailles sur le fonctionnement des arbres et leur réaction, afin de proposer les premiers outils d'une compréhension bilatérale de cette problématique : d'une part, l'effet de la taille sur les arbres et, d'autre part, la réaction des arbres à cette taille. Je pense que cette problématique peut être envisagée comme étant la résultante d'un conflit d'occupation de l'espace. Afin d'optimiser la compréhension de ce phénomène, nous proposons l'analyse de scènes T-LiDAR. Nous présentons ainsi dans un premier temps une méthode d'analyse de ces données entièrement développée par nos soins, permettant d'analyser l'occupation de l'espace par les arbres. Dans un deuxième temps, nous proposons une analyse de la réaction des arbres aux tailles de dégagement des réseaux électriques à long et court terme. Dans l'ensemble, cette étude permet de cibler des caractéristiques et des mécanismes qui jouent un rôle central dans la réaction des arbres aux tailles unidirectionnelles en « V » permettant d'en arriver à l'élaboration d'un système théorique d'interaction taille/arbre ; en somme, à une compréhension globale du phénomène.

Mots Clefs : Taille unidirectionnelle en « V », Érables argentés, LiDAR, voxelisation, exploration de l'espace.

INTRODUCTION

0.1 L'architecture des arbres

Les arbres sont aujourd'hui communément considérés comme des organismes modulaires qui édifient leur forme grâce à la répétition génétiquement programmée d'un modèle initial; c'est le mécanisme de réitération (Oldeman, 1974; Hallé et Oldeman, 1978; Castro e Santos, 1980; Hallé, 1986; Barthélémy, 1991; Barthélémy et Caraglio, 2007). Ce mécanisme est rendu possible par l'activation d'un méristème*¹ présent dans la graine dont le fonctionnement va mener à la mise en place d'axes et de nouveaux bourgeons (Castro e Santos, 1980). Le fonctionnement conjugué de ces méristèmes conduit à un premier niveau d'organisation : l'unité architecturale* qui constitue, d'un point de vue structurel, physiologique et fonctionnel, l'unité fondamentale de l'espèce concernée (Caraglio et Edelin, 1990; Caraglio et Barthélémy, 1997; Barthélémy et Caraglio, 2007). L'unité architecturale constitue l'expression spécifique d'un des 23 modèles architecturaux* (Hallé et Oldeman, 1970; Barthélémy 1991; Barthélémy et Caraglio 2007), décrivant les différentes stratégies de croissance communes à l'ensemble du règne végétal. Au sein de l'unité architecturale, un nombre fini de catégories d'axes peut être mis en place (Caraglio et Edelin 1990; Caraglio et Barthélémy 1997), constituant un système hiérarchisé (Barthélémy et Caraglio, 2007).

Au cours de son développement, un arbre traverse différentes phases, correspondant chacune à un âge physiologique* (Raimbault et Tanguy, 1993). Ces transitions sont marquées par des modifications dans le fonctionnement de l'arbre, tels que la transition d'une croissance monopodiale* vers une croissance sympodiale* chez l'Érable argenté (Millet et Bouchard, 2003), l'alternance de phases hiérarchiques et polyarchiques (Millet

1. Pour tous les mots suivis d'un astérisque, voir appendice A pour les définitions.

et al., 1999), la spécialisation des nouvelles réitérations pour la reproduction (Barthélemy et al., 1989) ou la mise en place de caractéristiques appartenant à un ou des modèles architecturaux différents (Barthélémy et Caraglio, 2007).

0.2 La plasticité de la forme des arbres : réactions aux contraintes du milieu

0.2.1 Les réitérations non séquentielles

La réitération n'est pas seulement un mécanisme d'édification de la forme des arbres ; elle leur permet également de répondre à différents traumatismes et à différentes modifications de leur environnement. Il existe deux sortes de réitérations « réactives » : la réitération adaptative et la réitération traumatique. Contrairement à la réitération séquentielle, ces deux phénomènes découlent de la levée d'inhibition de bourgeons axillaires latents et ne sont pas automatiques, bien que prévisibles dans certaines circonstances. La réitération adaptative est un mécanisme opportuniste permettant à l'arbre de s'adapter à son environnement lumineux (Hallé, 1986).

La réitération traumatique, quant à elle, permet de compenser les pertes de branches ou un dépérissement de la couronne, afin de conserver la productivité de l'arbre (Castro e Santos, 1980). Cette réaction se traduit notamment par la mise en place de nouveaux axes ayant pour but de recoloniser (au moins partiellement) l'espace libéré lors du traumatisme (Ishii et al., 2007). Ces deux mécanismes confèrent aux arbres une plasticité architecturale leur permettant de répondre efficacement aux contraintes imposées par leur milieu.

0.2.2 Comment la lumière modèle les arbres

La lumière constitue un élément abiotique de première importance pour la croissance et le développement des végétaux. Lorsque les réserves disponibles en éléments minéraux et en eau sont suffisantes, elle devient le premier facteur limitant de la croissance (Bauerle, 2004). En milieu forestier, les arbres prennent part à une course à la

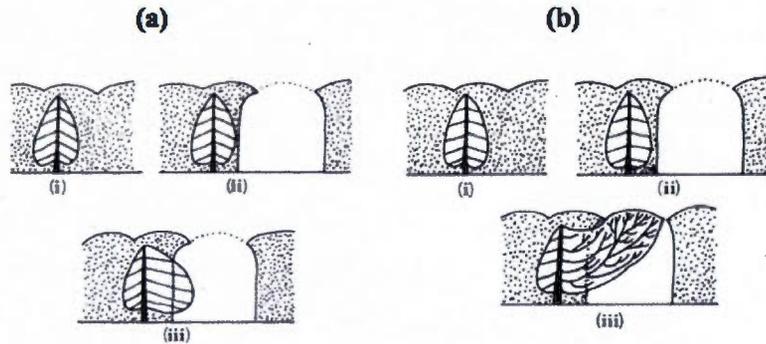


Figure 0.1 Schéma proposé par Hallé (1986) illustrant l'adaptation aux modifications de condition lumineuse de l'environnement par réitération adaptative. (a) : un arbre unitaire dépourvu de la capacité de réitération; (b) : un arbre colonaire capable de réitérer. (i) l'arbre dans son environnement initial, (ii) une trouée apparaît à proximité de l'arbre, (iii) l'arbre réagit.



Figure 0.2 Photographies illustrant la mise en place de réitérations traumatiques suite à des tailles intensives. (a) photographie de réitérations traumatiques sur un Frêne d'Amérique (*Fraxinus americana*); (b) prolifération de réitérations traumatiques sur un Érable argenté (*Acer saccharinum*).

lumière fortement influencée par leur architecture et celle de leurs voisins. Plusieurs études se sont attachées à démontrer la grande plasticité architecturale des arbres, plasticité leur permettant de répondre à des contraintes de captation de la lumière en milieu forestier de façon plus ou moins efficace selon l'espèce (Canham, 1988; Messier et Nikinmaa, 2000; Stancioiu et O'Hara, 2006). Ainsi, il apparaîtrait que les espèces les plus tolérantes à l'ombre font preuve d'une plasticité plus importante leur permettant de s'adapter plus facilement aux sources de lumière (Canham, 1988; Chen et al., 1996; Kunstler et al., 2005), cette plasticité correspondant à la capacité à mettre en place des réitérations adaptatives (figure 0.1). De plus, l'architecture, la forme et la morphologie des arbres jouent un rôle sur la disponibilité en lumière dans les étages inférieurs (Canham et al., 1994; Lefrançois et al., 2008). D'où l'importance des caractéristiques architecturales (et de leur plasticité) des espèces dans la dynamique de succession forestière (Chen et al., 1996; Millet et al., 1999; Kunstler et al., 2005; Petritan et al., 2009).

Au sein même des arbres, de nouvelles contraintes s'ajoutent. Celles-ci ne proviennent alors plus de l'environnement mais de la forme et de l'architecture des arbres eux-mêmes. À l'intérieur d'un arbre, l'interception de la lumière est étroitement liée à la fermeture de la couronne, à la surface foliaire (Bréda et al., 2002) et à la disposition spatiale des feuilles. Ainsi, le nombre de branches (Niinemets et al., 2004a), leur longueur, leur inclinaison (Niinemets et al., 2004b) et la longueur des entre-nuds (Gielen et al., 2002) qui découlent directement des modalités de croissance et de développement de l'arbre, jouent un rôle déterminant dans l'interception de la lumière et dans le phénomène d'auto-ombrage (Delagrangé et al., 2006). Ce dernier phénomène, désignant l'ombre créée au sein d'un arbre par ses propres feuilles, est, de plus, fortement influencé par la phyllotaxie et conduit à l'élagage naturel des branches basses les plus ombragées (Takenaka, 2000). L'adaptation à la lumière est donc un facteur important de la variabilité de la forme des arbres et conditionne leur forme, la dispersion du matériel au sein de leur couronne et leur performance. Cependant, et notamment en milieu urbain, les arbres font face à une nouvelle contrainte d'origine anthropique liée à leur milieu : la

taille.

0.2.3 La taille : une nouvelle contrainte

En milieu naturel, les arbres peuvent être sujets à des pertes de branches dues au vent, à l'herbivorie ou à la chute d'un arbre voisin. Cette contrainte se retrouve dans les milieux anthropisés (ligniculture, horticulture fruitière, foresterie urbaine, etc.) où les arbres sont amenés à subir des suppressions plus ou moins importantes de branches qui, en plus d'entraîner des coûts pour les gestionnaires (Toussaint et al., 2002), peuvent avoir des conséquences souvent lourdes sur la santé des arbres. Il a été démontré que l'intensité de ces coupes, les conditions environnementales dans lesquelles elles sont faites, la santé de l'arbre (Marquier et Balandier, 2000) et son stade physiologique (Raimbault et al., 1995) jouent un rôle important sur l'impact des tailles et la réponse qui y sera apportée. Des tailles de fortes intensités pouvant conduire à une perte allant jusqu'à 70% des réserves de l'arbre (Toussaint et al., 2002). Lorsqu'elles entraînent l'ablation de branches de gros diamètre, les tailles favorisent l'entrée de maladies, entraînant à terme des problèmes mécaniques qui augmentent les risques de bris de branches (Smith, 2006). L'élagage peut également être un facteur important de modification de l'interception lumineuse d'un arbre (Stephan et al., 2008) et de sa performance photosynthétique (Pinkard et Beadle, 1998 ; Pinkard et al., 1998a), en affectant notamment le volume foliaire et la forme des feuilles (Pinkard et Beadle, 1998b). L'arbre va donc réagir afin de retrouver son équilibre initial, notamment en mettant en place des réitérations traumatiques. Bien que dans le cas d'arbres vigoureux, la croissance de ces rejets puisse supplanter celle d'arbres non taillés (Marquier et Balandier, 2000), une forte taille peut aussi mener à une réduction de l'accroissement du volume de la couronne (Pinkard et Beadle, 1998b). En effet, si les rejets compensent efficacement les pertes en terme de nombre de branches, la biomasse produite diminue en fonction de l'intensité de la taille (Rasmussen et Nørgaard, 2005), alors que le pourcentage de la couronne constituée par ces rejets augmente (Millet et Bouchard, 2003). La distribution spatiale des rejets est par ailleurs fortement influencée par la disponibilité en lumière au sein de la couronne (Pinkard et

al., 1998; Pinkard et Beadle, 1998b; Stephan et al., 2007 et 2008). Enfin, la taille peut mener à la mise en place de fourches traumatiques pouvant présenter des problèmes de tenue mécanique comme des écorces incluses (Drenou, 2000). En somme, la taille contribue à modifier fortement la position des axes, du volume foliaire et modifie, plus ou moins profondément, selon son intensité le fonctionnement de l'arbre (Stephan et al., 2008), notamment en modifiant la hiérarchie entre les axes et la position des fourches principales (Millet et Bouchard, 2003).

0.2.4 Cas particulier des tailles de dégagement des réseaux électriques

À Montréal, environ 11% des pannes de courant sont causées par des branches en contact avec les conducteurs (Hydro-Québec, 2010). Pour pallier à ces désagréments, Hydro-Québec a mis en place des campagnes d'émondage qui visent à dégager les fils en supprimant les branches présentes à l'intérieur d'une distance prescrite (Hydro-Québec, 2009; Figure 0.3). Les interventions sont réalisées conformément à un cycle d'une durée plus ou moins longue (Browing et Wiant, 1997), conduisant à quatre cas de figures qui dépendent de la position des fils par rapport à l'arbre (Millet et Bouchard, 2003; Figure 0.4). Ces tailles dites « unidirectionnelles » conduisent le plus souvent à la création d'une couronne bilatérale en « V » (Millet et Bouchard, 2003; Figure 0.4 c et d). Les coûts économiques sont très importants pour les distributeurs et les gestionnaires, et sont liés essentiellement à la durée du cycle de taille (Miller et Sylverster, 1981; Browing et Wiant 1997). De plus, ces interventions sont souvent mal perçues par les riverains en raison de leur caractère inesthétique (Kuhns et al., 2007). Plusieurs études démontrent le manque d'efficacité de ces tailles, qui vont parfois à l'encontre de l'objectif recherché (Millet et Bouchard, 2003), et des préconisations ont été faites afin d'améliorer leurs performances. Par exemple : adapter la longueur des cycles de taille en fonction des besoins des différentes espèces (Nowak, 1990) ou tenir compte des caractéristiques architecturales des arbres afin de minimiser leur impact tout en améliorant leur efficacité dans le temps (Millet et Bouchard, 2003). Telle que nous l'avons expliqué précédemment, la principale réponse des arbres à de telles tailles consiste en la mise en place de réitérations

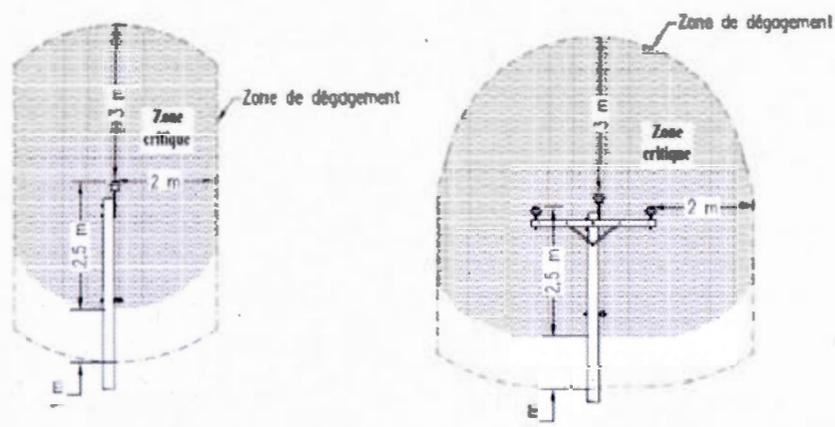


Figure 0.3 Schéma des préconisations de dégagements critiques imposées par Hydro-Québec autour des réseaux électriques. La zone grise représente le volume à l'intérieur duquel aucun élément de végétation ne doit être présent ; à gauche : autour des lignes de distribution basse tension ; à droite : autour des lignes de distribution moyenne tension (Hydro-Québec, 2009).

traumatiques. Goodfellow (et al., 1987) emploie le terme de recroissance afin de qualifier ce phénomène et a démontré que chez de nombreuses espèces, dont l'Érable argenté (*Acer saccharinum*), cette réaction est vive la première année consécutive à la taille et diminue les années suivantes. Chez certaines espèces, l'ontogenèse résulte de l'alternance de phases hiérarchiques, au sein desquelles les axes s'organisent sous la dominance d'un faible nombre de bourgeons apicaux, et polyarchiques ou la multiplication des bourgeons apicaux et des réitérations ne permet pas d'établir de forte hiérarchisation entre les axes (Millet et al., 1999). La taille réalisée dans le but de dégager les réseaux électriques peut alors conduire à une modification profonde de l'architecture. Elle contribue notamment à instaurer une forte hiérarchie dans le centre de la couronne induisant une croissance très forte des rejets, les parties non taillées conservant une organisation hiérarchique (Millet et Bouchard, 2003).

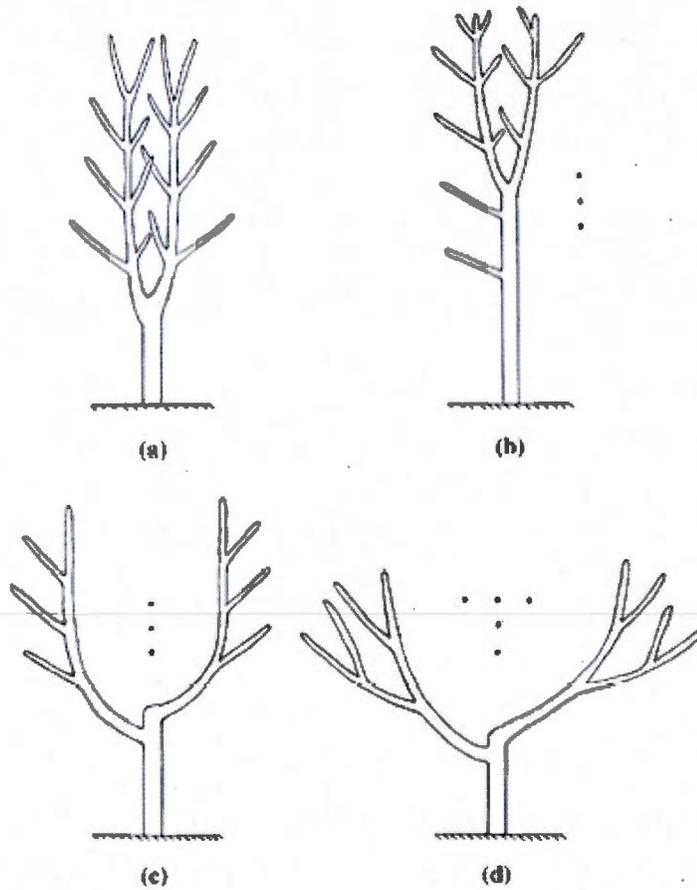


Figure 0.4 Les quatre cas de figures menant au dégagement des réseaux électriques. (a) pas de fils ; (b) fils verticaux situés latéralement ; (c) fils verticaux situés au dessus de l'arbre ; (d) fils verticaux et horizontaux situés au dessus de l'arbre (Millet et Bouchard, 2003).

0.3 Théories de modélisation de la croissance des plantes : vers une compréhension simplifiée des arbres

Historiquement les modèles de simulation de la croissance des plantes ont principalement été développés dans le but de « faire des expériences agronomiques virtuelles en extrapolant le développement de l'arbre par rapport à une situation donnée ou en interpolant par simulation entre deux situations contrôlées » (Barczi et al., 1997) dans le but d'étudier leur productivité selon les critères agricoles. La simulation de la croissance des arbres a ensuite été développée dans le but de tester des hypothèses scientifiques. Il en existe différents types de modèles de simulation (Marcelis et Heuvelink, 2007), s'appuyant sur des concepts différents et poursuivant des objectifs divers. Ces modèles reposent sur la modélisation de l'assimilation et de l'allocation du carbone. La relation sources-puits est une des théories permettant de modéliser l'activité photosynthétique d'une plante et l'allocation des assimilats dans ses différents organes. Les sources sont ici définies comme étant les activités d'assimilation de carbone (photosynthèse et réserves) et les puits les activités consommatrices (croissances primaire et secondaire, ramification, fructification, etc.). Il s'agit alors d'établir un rapport entre l'offre produite par les organes sources et la demande des organes puits dans le but de simuler l'allocation du carbone dans l'ensemble de la plante pour un pas de temps constant (Lacointe, 2000). Pour ce faire, une force de puits est définie pour chaque organe (Lacointe, 2000 ; Marcelis et Heuvelink, 2007), en assumant que l'ensemble des assimilats produits par les sources peuvent être utilisés n'importe où dans la plante. Ainsi, chaque pas de temps est caractérisé par un rapport Q / D ; la quantité Q de carbone assimilé est alors calculée. Elle est ensuite placée dans un « pool commun », puis redistribuée aux organes puits, dont la somme D constitue la demande totale de la plante afin de produire de la biomasse. Certains modèles permettent ensuite de produire une simulation respectant les règles architecturales et ontogéniques de la plante en intégrant des caractéristiques morphologiques et génomiques (De Reffye et al., 1988 ; Jaeger et De Reffye, 1992). Ce type de simulation permet, à chaque pas de temps, de reconsidérer la force de puits de chaque organe en fonction des conditions environnementales ou internes, et d'intégrer

par exemple un effet taille (Lacointe, 2000).

La théorie du « Pipe model » est une relation allométrique couramment utilisée dans divers domaines de l'étude des végétaux, et notamment celle des arbres. Elle stipule que le tronc d'un arbre et l'ensemble de ses branches peuvent être considérés comme des tuyaux assurant le transport des réserves et produits de la photosynthèse entre les organes souterrains et les organes photosynthétiques. Elle présuppose notamment une forte corrélation entre la surface d'aubier mesurée à un point de l'arbre et le nombre, la masse et la surface foliaire portés par l'élément mesuré (branche ou tronc) (Shinozaki et al., 1964). Cette relation permet par exemple de mettre sur pied des méthodes d'analyse non-destructives de ces paramètres (Nygren et al., 1993) et est également utilisée par des modèles dynamiques de simulation de la croissance des arbres (Sievänen et al., 2000), tels que AMAPpara (de Reffye et Houllier, 1997) ou LIGNUM (Perttunen et al., 1996). Au sein de ce dernier, la relation pipe model permet de calculer la croissance radiale en supposant que l'augmentation de la surface d'aubier d'un segment ligneux est proportionnelle à celle du volume de feuillage qu'il porte. Une équation a d'ailleurs été proposée afin de répartir cette augmentation dans l'ensemble de l'arbre : $D = D1 + D2 + D3$ où D correspond au diamètre d'un segment portant trois segments de diamètres $D1$, $D2$ et $D3$ (Perttunen et al., 1996). Il semblerait que cette relation soit fortement influencée par les conditions environnementales (Berninger et Nikinmaa, 1997). Cependant, cette théorie prête le flanc à la critique, provenant notamment du domaine de l'architecture hydraulique des arbres. Par exemple, Tyree et Ewers (1991) lui reprochent de supposer que la surface d'aubier allouée à une quantité donnée de feuillage est constante et de ne pas tenir compte notamment de la longueur des « tuyaux » pouvant influencer des résistances hydrauliques. Toutefois, malgré ces critiques, la théorie du « pipe model » reste un excellent indicateur pour calculer l'état général d'un arbre.

En extension de cette théorie, plusieurs auteurs ont développé un indicateur de la vigueur des rejets au sein de la couronne d'arbres : « l'index de vigueur » (Goulet et al., 2000 ; Nikinmaa et al., 2003). Cet index suppose que la croissance d'un rejet est fortement liée à sa position dans la couronne, à son environnement lumineux et au

diamètre de son axe porteur. En considérant des ressources du sol stables, il considère que les ressources transportées par une branche sont proportionnelles à son diamètre et que cette capacité de transport se réduit à chaque embranchement, le rejet de plus gros diamètre y étant favorisé. Ainsi, cet index propose qu'un rejet présentant un diamètre important aura une croissance supérieure à un rejet situé sur le même embranchement mais de diamètre plus faible.

La modélisation de la croissance de plantes repose sur la simplification des phénomènes complexes interagissant au sein de l'arbre tout en conservant une description réaliste de la plante modélisée. Cette simplification permet notamment de regrouper, sous un terme et une valeur unique, plusieurs phénomènes biologiques favorisant une décomplexification de l'explication des phénomènes observés, tout en conservant une forte valeur scientifique.

0.4 État des connaissances sur la télédétection

La télédétection est une discipline récente de l'analyse des systèmes végétaux et naturels, résultant de l'interaction entre un développement technique d'outils de mesures et l'application, aux données obtenues à l'aide de ces outils, de méthodes d'analyses ciblées permettant de vérifier des hypothèses scientifiques. La télédétection a donc pour finalité, dans un contexte botanique, l'analyse informatisée de végétaux numérisés à l'aide de capteurs. Elle permet ainsi l'obtention et le traitement de données complexes dans le but de décrire quantitativement ou qualitativement un phénomène impliquant des modifications physiques ou géométriques de la plante concernée.

0.4.1 Le T-LiDAR

Le LiDAR (Light Detection and Ranging) est un capteur destiné à la télédétection d'objets en trois dimensions. Par l'intermédiaire d'un faisceau laser, il permet l'acquisition de données tridimensionnelles d'un objet sous la forme d'un nuage de points référencé dans un repère cartésien (x, y, z) . L'appareil est constitué d'un laser, d'un

capteur et d'un système d'enregistrement mémorisant la distance (donnée par le temps mis par l'impulsion laser pour faire un aller-retour entre l'appareil et un objet) et l'angle de l'impulsion. Le LiDAR permet la détection d'objets situés dans un champ angulaire variable selon les modèles (40° x 40° pour le modèle ILRIS de la firme Opetch) sur une distance limitée par la sensibilité du capteur et la dispersion lumineuse. Son habilité à capter la morphologie d'un objet dans sa complexité en fait un outil de choix pour l'analyse d'arbres ou de peuplements forestiers. Il existe principalement deux types de LiDAR : aéroporté (A-LiDAR) ou terrestre (T-LiDAR). Ils permettent tous deux l'étude et la modélisation de situations très différentes, notamment dans le cadre d'études des milieux naturels ou urbains. Ainsi, le A-LiDAR est principalement utilisé dans le cadre d'études à grandes échelles (Means et al., 1999 ; Hudak et al., 2002 ; Brown et al., 2005 ; etc.) et à des fins principalement cartographiques. Le T-LiDAR, en revanche, bien que possédant un champ d'action plus restreint, permet une captation plus fine des objets composant le paysage, de l'échelle de l'arbre individuel (Côté et al., 2009 ; Bucksch et al. 2009) à celle du peuplement forestier (Morsdorf et al., 2004). Les applications sont, quant à elles, multiples : analyse de la structure forestière (Morsdorf et al., 2004 ; Fleck et al., 2007) ou reconstruction tridimensionnelle d'arbres individuels (Côté et al., 2009 ; Bucksch et Fleck, 2011). Certaines études s'appuient d'ailleurs sur la complémentarité du T-LiDAR et du A-LiDAR (Omasa et al., 2007). Le LiDAR est donc un outil très versatile, et chaque application repose sur la mise au point de modèles pouvant être de conceptions très différentes.

0.4.2 L'utilisation du LiDAR terrestre pour la description d'arbres individuels

Les données LiDAR comportent intrinsèquement quatre défauts liés soit au fonctionnement de l'appareil, soit à la prise d'information sur des objets tridimensionnels (Bucksch et al., 2010) :

- une variation de la densité de points due à la nature sphérique de la prise d'information
- un sur-échantillonnage dû à la superposition de différents scans (provenant de

différentes vues) lors de leur assemblage dans un même repère

- un sous-échantillonnage causé par un phénomène d'occlusion (superposition spatiale de deux objets)
- du bruit et des erreurs systématiques causant une perte d'information sur la structure de l'objet principalement attribuable à la déviance du rayon ou au vent.

Afin d'atténuer l'impact de ces défauts, plusieurs avenues complémentaires peuvent être empruntées, avenues qui permettent, sinon de les éliminer, du moins de réduire leurs effets. Ainsi, lors de la prise de données, plusieurs vues peuvent être prises dans différentes directions afin de réduire les problèmes d'occlusion (Côté et al., 2009). Le sur-échantillonnage peut, pour sa part, être éliminé par une harmonisation de la densité du nuage de points à l'aide d'outils proposés par les logiciels de traitement et de visualisation de scènes LiDAR (permettant par exemple la conservation d'un point unique à l'intérieur d'une sphère de rayon donné). Le bruit peut, quand à lui, être réduit à l'aide d'algorithmes « de nettoyage » ou d'outils proposés eux aussi par les logiciels spécialisés (telle que la sélection de points isolés de tout autres points pour une distance donnée). Enfin, les techniques d'analyse des scènes LiDAR doivent être développées en prenant en compte ces problèmes. Dans cette optique, différentes voies d'exploration des données issues du T-LiDAR, que l'on peut catégoriser en deux ensembles, ont été développées :

1. L'extraction de descripteurs généraux des arbres. Cette voie vise essentiellement à extraire des données LiDAR des paramètres descriptifs du fonctionnement des arbres ou des stands forestiers : densité de la végétation ou de la couronne d'arbres isolés (Durrieu et al., 2008), la structure forestière (Strahler et al., 2008), la LAI (Leaf area index) (Kwak et al., 2007 ; Koetz et al., 2006), etc.
2. L'extraction de données concernant la structure fine et l'architecture des arbres. Il s'agit alors de créer une maquette numérique de l'arbre à partir des données LiDAR, puis d'extraire des données quantitatives de cette maquette. À cet effet, de nombreuses études se sont penchées sur des méthodes conduisant à la recons-

truction (Verroust et Lazarus, 2000 ; Bucksch et Lindenbergh, 2008 ; Côté et al., 2009 ; Bucksch et Fleck, 2009 ; etc.).

0.4.3 La voxelisation : une voie d'étude des données LiDAR

La prise de données LiDAR résultent en la création de nuages de points tridimensionnels référencés dans un repère cartésien (x, y, z) et plusieurs méthodes d'analyse de ces données existent. L'une d'entre elles, la voxelisation, consiste en un découpage de l'espace tridimensionnel en objets de volumes égaux : les voxels. La voxelisation permet aussi bien d'extraire des nuages de points des données quantitatives que des données structurelles. Elle permet, entre autre, l'étude quantitative de la densité de la couronne (Durrieu et al., 2008) ou l'extraction de squelettes représentatifs de la structure des arbres (Gorte et Pfeifer, 2004 ; Bucksch et Lindenbergh, 2008 ; Bucksch et Fleck, 2011).

0.5 Objectifs et hypothèses

Les interventions de taille de forte intensité peuvent entraîner une réduction de l'accroissement de la couronne. La taille pourrait donc avoir un double effet de réduction du volume exploré par la couronne des arbres. À court terme d'abord, en entraînant une réduction significative de l'accroissement du volume de la couronne. Les arbres soumis à la taille présenteraient à long terme un volume d'espace exploré par la couronne significativement inférieur à celui d'arbres non taillés.

- **Hypothèse 1 : la taille induirait une réduction de la croissance des arbres et du volume d'espace exploré par leur couronne.**
- **Sous hypothèse 1.1 : la taille pourrait influencer négativement la croissance des arbres réduisant ainsi l'accroissement de la couronne.**
- **Sous hypothèse 1.2 : la taille modifierait le volume général de matériel dans la couronne des arbres. Conséquemment la mise en place de rejets ne parviendrait pas à compenser les pertes induites par les tailles.**

Suite aux tailles, les arbres réagissent notamment en mettant en place des réitérations traumatiques dans la partie de la couronne subissant les interventions. Ces réitérations traumatiques, dont la position est influencée par la disponibilité en lumière, croissant de façon non hiérarchisée et entrant de nouveaux en conflits avec les réseaux électriques après quelques années parviendraient à compenser les pertes en terme de nombre de branches mais pas en terme de biomasse. Ces réitérations traumatiques, situées principalement sur des branches maîtresses de diamètre important, bénéficieraient d'un afflux de sève important, en accord avec le Vigor Index, privant ainsi le reste de la couronne d'une partie des ressources ; générant ainsi une modification des modalités d'allocation de la biomasse en modifiant notamment la relation source/puits. Ce qui entrainerait une réduction de la croissance dans les parties de la couronne non affectées directement par la taille.

- **Hypothèse 2 : suite aux tailles, les arbres concentreraient la croissance dans le centre de la couronne (partie affectée), ce qui se traduirait par la mise en place de réitérations traumatiques, ayant pour effet de réduire la croissance en périphérie de la couronne.**

La réponse des arbres aux tailles de dégagement des réseaux électriques traite de problématiques ciblées (croissance de réitérations traumatiques, modification de la forme générale de la couronne). Dans le contexte de cette étude, ou la prise en compte de la totalité du matériel de la couronne est rendue possible par l'analyse de données T-LiDAR, nous proposons de nouvelles hypothèses. Nous comptons d'abord quantifier les propriétés des couronnes bilatérales induites par la taille, et notamment le volume de matériel présent de part et d'autre des conducteurs électriques. La taille pourrait ainsi induire la création de deux zones latérales concentrant une grande proportion de matériel contrairement aux arbres témoins qui présenteraient une concentration plus diffuse du matériel dans l'ensemble de leur couronne avec un pic à l'aplomb du tronc. Cette modification de la dispersion du matériel dans la couronne des arbres taillés pourrait entrainer une superposition plus importante de branches menant à une densification des zones latérales.

- **Hypothèse 3 : les interventions de taille modifieraient la dispersion du**

matériel dans la couronne

- **Sous hypothèse 3.1 : la taille conduirait notamment à la mise en place d'une couronne bilatérale.**
- **Sous hypothèse 3.2 : la taille conduirait à une densification des parties de la couronne non taillées.**

Afin de vérifier ces hypothèses qui visent à mettre en évidence les modifications d'occupation de l'espace des arbres induites par les interventions de dégagement des réseaux électriques une description de la couronne des arbres dans sa complexité est primordiale. Notre choix s'est porté sur l'utilisation du T-LiDAR puisqu'il permet l'obtention de données d'une grande précision pour un temps de mesure restreint. L'analyse des données LiDAR repose sur la mise en pratique de méthodes algorithmiques développées dans la perspective de répondre à des hypothèses scientifiques données.

- **Objectif : développer une méthode d'analyse des données LiDAR permettant de vérifier des hypothèses concernant les modifications d'occupation de l'espace induites par les tailles de dégagement des réseaux électriques.**

Après avoir mis en pratique des méthodes déjà existantes, la nécessité de développer une nouvelle méthode d'analyse des données LiDAR plus ciblée s'est avérée indispensable. Nous avons donc décidé de proposer une nouvelle approche basée sur une approche par voxelisation.

- **Hypothèse de l'objectif : Une approche basée sur la voxelisation peut permettre de conceptualiser et de mettre en application de nouveaux descripteurs permettant de répondre aux questions posées dans cette étude.**

CHAPITRE I

VOXR, UN PACKAGE DÉDIÉ À L'ANALYSE DE SCÈNES LIDAR DANS R

- Bastien Lecigne, auteur principal : Centre d'étude de la Forêt, Département des Sciences Biologiques, Université du Québec à Montréal, C.P. 8888, Succ. Centre-Ville, Montréal, Canada, H3C 3P8. mail : lecignebastien@gmail.com ; Fax : (514) 987 4647 ; Tel : (514) 987 3000 6936
- Sylvain Delagrangé : Centre d'étude de la Forêt, Institut des Sciences de la Forêt Feuillue Tempérée, Département des Sciences Naturelles, Université du Québec en Outaouais, C.P. 8888, Succ. 58 rue Principale, Ripon (Québec) Canada J0V 1V0. mail : sylvain.delagrangé@uqo.ca.
- Christian Messier : Centre d'étude de la Forêt, Département des Sciences Biologiques, Université du Québec à Montréal, C.P. 8888, Succ. Centre-Ville, Montréal, Canada, H3C 3P8. mail : messier.christian@uqam.ca.

Résumé

Dans le cadre d'une étude portant sur la mise en évidence des modifications architecturales induites par les tailles de dégagement des réseaux électriques sur la couronne des arbres, nous proposons un package R permettant la description de la structure complexe des arbres à partir de données T-LiDAR. Le développement de nouveaux outils nécessite la conceptualisation et la mise en application de descripteurs dédiés. En ce sens, nous proposons un panel d'outils algorithmiques originaux permettant l'extraction de données structurales, quantitatives ou comparatives de scènes T-LiDAR. Basés sur la voxelisation du nuage de points original ces algorithmes permettent d'analyser les modalités d'exploration de l'espace par les arbres. Pour ce faire, plusieurs algorithmes permettent l'extraction de données de dispersion spatiale des voxels, de saturation de l'espace, la comparaison entre deux scènes LiDAR d'un même arbre ou la reconnaissance d'objets botaniques à partir de nuages de voxels. Nous proposons également une courte discussion sur le choix de la résolution des voxels basée sur des essais et des observations visuelles. L'utilisation des voxels permettant notamment une réduction des phénomènes d'occlusion, de l'hétérogénéité des nuages de points LiDAR et permet de réaliser de forts nettoyages sans perte d'informations sur la description de la structure des arbres.

Mots clefs : langage R, T-LiDAR, voxelisation, arbres, nuages de points 3D.

1.1 Introduction et contexte de développement

La librairie présentée dans ce chapitre a été développée dans le cadre d'une étude portant sur la mise en évidence des modifications architecturales et structurales induites par les tailles de dégagement des réseaux électriques sur la couronne d'arbres de grande dimension. Pour ce faire, le choix a été fait de baser cette étude sur l'acquisition et l'analyse de données obtenues à l'aide de LiDAR terrestre (T-LiDAR) afin d'étudier cette problématique en tenant compte de l'ensemble de la structure de la couronne des arbres. Le LiDAR est un outil de télédétection permettant la numérisation en 3D d'un objet sous la forme d'un nuage de points référencé dans un repère cartésien (x, y, z) . Bien que

ces données soient d'une très grande précision, « les nuages de points sont des données non-structurées qui doivent être reconstruites à l'aide de programmes dédiés pour offrir une information » (Dassot et al. 2011) quantitatives et/ou qualitatives décrivant les caractéristiques physiques ou structurelles du phénomène étudié. L'utilisation du T-LiDAR en foresterie se concentre principalement sur l'extraction de descripteurs physiques dans l'optique de caractériser la structure forestière (Morsdorf et al., 2004 ; Fleck et al., 2007). À l'échelle de l'arbre individuel, plusieurs auteurs présentent des outils d'analyse permettant de quantifier par exemple la densité de la végétation ou de la couronne d'arbres isolés (Durrieu et al., 2008), la LAI (Leaf area index) (Kwak et al., 2007 ; Koetz et al., 2006 ; Delagrangé et Rochon, 2011) ou les dimensions des arbres : hauteur totale, hauteur et volume de la canopée (Delagrangé et Rochon, 2011). D'autres auteurs s'attachent à décrire et à quantifier la structure fine et l'architecture de l'arbre par l'intermédiaire de la génération, à partir des nuages de points LiDAR, de maquettes informatiques tridimensionnelles (Gorte et Winterhalder 2004 ; Bucksch et Lindenbergh, 2008 ; Bucksch et Fleck, 2009 ; Binney et Sukhatme, 2009 ; Côté et al., 2011).

Nous avons d'abord investigué dans cette dernière voie en mettant au point une méthode de reconstruction s'appuyant sur la colonisation du nuage de points telle que décrite par Verroust et Lazarus (2000). Après plusieurs essais de mise en application de cet outil, nous nous sommes rendu compte qu'il ne permettait pas la reconstruction d'arbres de grandes dimensions. Cet algorithme a alors été transcrit sous la forme d'une méthode semi automatisé de reconstruction des arbres. Nous attribuons cet échec à des problèmes récurrents des nuages de points issus de la digitalisation LiDAR. À savoir un sous échantillonnage dû à des phénomènes d'occlusion et à une forte présence de bruit (Bucksch et al., 2010), notamment dans la partie haute de la couronne, probablement causé par un faible vent (Dassot et al. 2011).

Il nous est alors paru indispensable de développer une approche originale permettant d'extraire des descripteurs de la structure des arbres et capable de passer outre les problèmes mentionnés ci-dessus. Cette méthode basée sur la voxelisation permettant d'englober l'arbre dans une matrice de cubes de dimension similaire : les voxels. Les

voxels sont déjà utilisés par de nombreux auteurs et permettent d'extraire la densité de la couronne d'arbres (Durrieu et al., 2008), l'extraction de données dimensionnellement (Henning et Radtke, 2006), l'estimation du volume d'un arbre (Lefsky et McHale, 2008) ou de mener à une squelettisation (Gorte et Pfeifer, 2004 ; Gorte et Winterhalder 2004 ; Bucksch et Lindenbergh, 2008 ; Lefsky et McHale, 2008 ; Pål , 2008 ; Bucksch et Fleck, 2011). Notre choix s'est porté sur l'utilisation de voxels car nous pensons que leur utilisation permet de réaliser un fort nettoyage visant à supprimer le bruit des nuages de points sans perte d'information sur la structure de l'arbre. Par ailleurs, les limites de l'utilisation des voxels sont également bien connues (Gorte et Pfeifer, 2004).

La librairie présentée dans ce chapitre comporte plusieurs fonctions permettant (i) la voxelisation, (ii) une analyse fine de la dispersion des voxels, (iii) la comparaison entre différents nuages de points d'un même objet et (iv) la visualisation de certaines analyses. Ces algorithmes permettent d'étudier la façon dont les arbres explorent l'espace. Pour ce faire, plusieurs descripteurs originaux ont été conceptualisés et mis en forme par nos soins.

1.2 Prise de données et prétraitement

Les exemples donnés d'application de cette librairie s'appuient sur des scènes LiDAR prises dans différents contextes. Nous disposons d'abord des scènes LiDAR de neuf Érables argentés (*Acer saccharinum*) situés en milieu urbain. Quatre de ces arbres sont situés sous des réseaux électriques et subissent des cycles d'émondages destinés à dégager et à sécuriser les lignes. Les cinq autres sont libres de fils. Des scans LiDAR ont été réalisés durant l'hiver lorsque les arbres n'avaient pas de feuilles à l'aide d'un capteur Ilris 3d en trois temps : avant taille, après taille (uniquement pour les arbres taillés) et après une année de croissance. À chaque temps, les prises de données ont été effectuées de manière à réaliser une triangulation autour de chacun des arbres, ce qui permet de réduire les phénomènes d'occlusion (Coté et al. 2011). Cependant, la disponibilité réduite en espace au sol, nous a contraint à réaliser une triangulation partielle autour des arbres, à savoir que deux des trois vues sont situées sur le même trottoir

que l'arbre en formant un angle de 180° , l'une par rapport à l'autre, et que la troisième station est située sur le trottoir opposé. Nous disposons également de la scène LiDAR d'une Frêne d'Amérique (*Fraxinua americana*) numérisé à l'aide d'un LiDAR Faro en suivant le même procédé de prise de données. Enfin, nous disposons d'une scène LiDAR d'une plantation expérimentale de forme rectangulaire de Peupliers Hybrides. La scène LiDAR correspondante résulte de quatre prises de vues, réalisées à l'aide d'un LiDAR Ilris 3d, située chacune à un coin de la parcelle.

Les scans correspondant à une même scène ont été alignés. Les retours lasers correspondant à l'environnement ont été supprimés de la scène LiDAR résultante, excepté pour la scène LiDAR de la plantation pour laquelle le sol a, dans un premier temps, été conservé. L'orientation spatiale des scènes LiDAR et leur positionnement dans le repère orthonormé de référence a ensuite été normalisé pour l'ensemble de l'échantillonnage. Pour les scènes LiDAR d'arbres, l'axe des Z a été placé au zénith, l'axe des Y est parallèle à la rue et l'origine a été positionnée sur le tronc au niveau du premier embranchement. Pour la scène LiDAR de la plantation, le sol a été positionné dans le plan des axes x et y de façon à ce que les cotés de la parcelle soient parallèles à ces même axes.

Enfin, un nettoyage du nuage de points original des arbres scannés avec le LiDAR Ilris 3d a été réalisé dans le but de supprimer le bruit. Il repose sur la conservation d'un point unique dans une sphère de 2cm de diamètre suivi par la suppression de tous points isolés à plus de 5cm de tout autre point.

1.3 Description de la méthode

1.3.1 Méthode de voxelisation

La voxelisation proposée par VoxR consiste en l'ajustement d'une matrice de voxels au nuage de points original. Pour cela une résolution r est définie par l'utilisateur. Elle correspondra à la longueur d'une arête d'un voxel. Il en résulte la création d'un nuage de voxels référencés de r en r sur chacun des axes du repère orthonormé du nuage de

points original. Chacun des voxels de volume r^3 comptabilise le nombre de points du nuage de points original qu'il contient. La voxelisation ainsi décrite fait fi des voxels ne contenant aucun point afin de ne conserver que les voxels décrivant une portion de la structure de l'arbre. Cette méthode de voxelisation permet ainsi de mesurer le volume d'espace exploré par l'arbre à une résolution r prédéterminée.

1.3.2 Traitements des nuages de voxels

Une première voie d'analyse des nuages de points voxelisés, offerte par la fonction « project », consiste en la projection de celui-ci dans un plan (P) formé par deux axes du repère orthonormé x, y, z d'origine. Cette fonction permet la création d'une matrice de pixels de résolution r référencés dans P. Chacun des pixels contient alors des informations sur la densité de la colonne de voxels qui y a été projetée, à savoir : le nombre de voxels (nvox), le nombre de points (npts) et le rapport $npts/nvox$. La sous fonction « levels » permet ensuite de calculer des niveaux de densité permettant la définition de classes des variables nvox, npts ou $npts/nvox$. Deux possibilités sont offertes : soit les niveaux de densité sont définis comme des quantiles de la variable d'origine soit les niveaux sont définis comme étant un pourcentage défini par l'utilisateur de la variable d'origine. La fonction « surface » permet ensuite de calculer la surface occupée par chacune des classes de densité définie par la fonction « levels ». La surface est définie comme étant le produit du nombre de voxels de la classe de densité et de la surface r^2 d'un voxel. Il est à noter que lorsque $r^2 = 1$ le nombre de voxels est retourné.

Des traitement tridimensionnels des nuages de points voxelisés permettant d'extraire des variables de dispersion spatiale des voxels sont également offerts par la librairie VoxR. La fonction « point.distance.dispersion » permet de calculer la distance de chacun des voxels à un point dont les coordonnées sont définies par l'utilisateur. La fonction « axis.distance.dispersion » permet de calculer la distance de chaque voxel à un des axe du repère orthonormé. La fonction « axis.angle.dispersion » permet de calculer l'angle formé par un voxel et un axe du repère orthonormé par rapport à l'origine. Cette dernière fonction propose une option permettant de projeter le nuage de voxels dans un

plan formé par l'axe de référence et un autre axe du repère afin d'annuler l'effet de la forme sphérique des arbres.

La librairie VoxR propose également un algorithme, « `subtract.objects` » permettant de comparer deux scènes LiDAR (par exemple deux scènes LiDAR d'un même arbre à deux temps différents). Cet algorithme repose, pour chaque voxel d'une scène LiDAR sur la recherche dans une distance déterminée (`dist`) des voxels de l'autre scène. Une nouvelle table de données `x, y, z` est enfin créée ne comportant que les voxels uniques à une des deux scène LiDAR.

Le dernier algorithme proposé par VoxR « `objects.reconuition` » permet, dans une même Scène LiDAR, de détecter des objets spatialement différenciés : autrement dit, des objets présentant entre eux une rupture dans la continuité du nuage de points. Cet algorithme est bien adapté pour être utilisé sur les résultats fournis par la fonction « `substrats.objects` ».

1.3.3 Visualisation des résultats

Lors du développement de la méthode, l'ensemble des images bidimensionnelles ont été réalisées et visualisées à l'aide des fonctions standard de R. Les visualisations tridimensionnelles ont, quant à elles, été réalisées à l'aide du package de visualisation 3d « `rgl` » (Adler et Murdoch, 2011), notamment à l'aide de la fonction `plot3d`.

1.4 Mise en application et discussion sur les algorithmes

1.4.1 Voxelisation des nuages de points

La voxelisation des nuages de points telle que proposée par l'algorithme « `vox` » permet à l'utilisateur de définir la résolution (voir app. B.1 pour les appels de fonction). La figure 1.1 montre un même nuage de points (a) voxelisé à différentes résolutions de 1 m (b), 0,2 m (c) et 0,1 m (d). Plus la résolution choisie est fine, mieux le nuage de points est ajusté et mieux la structure de l'arbre est décrite par les voxels.

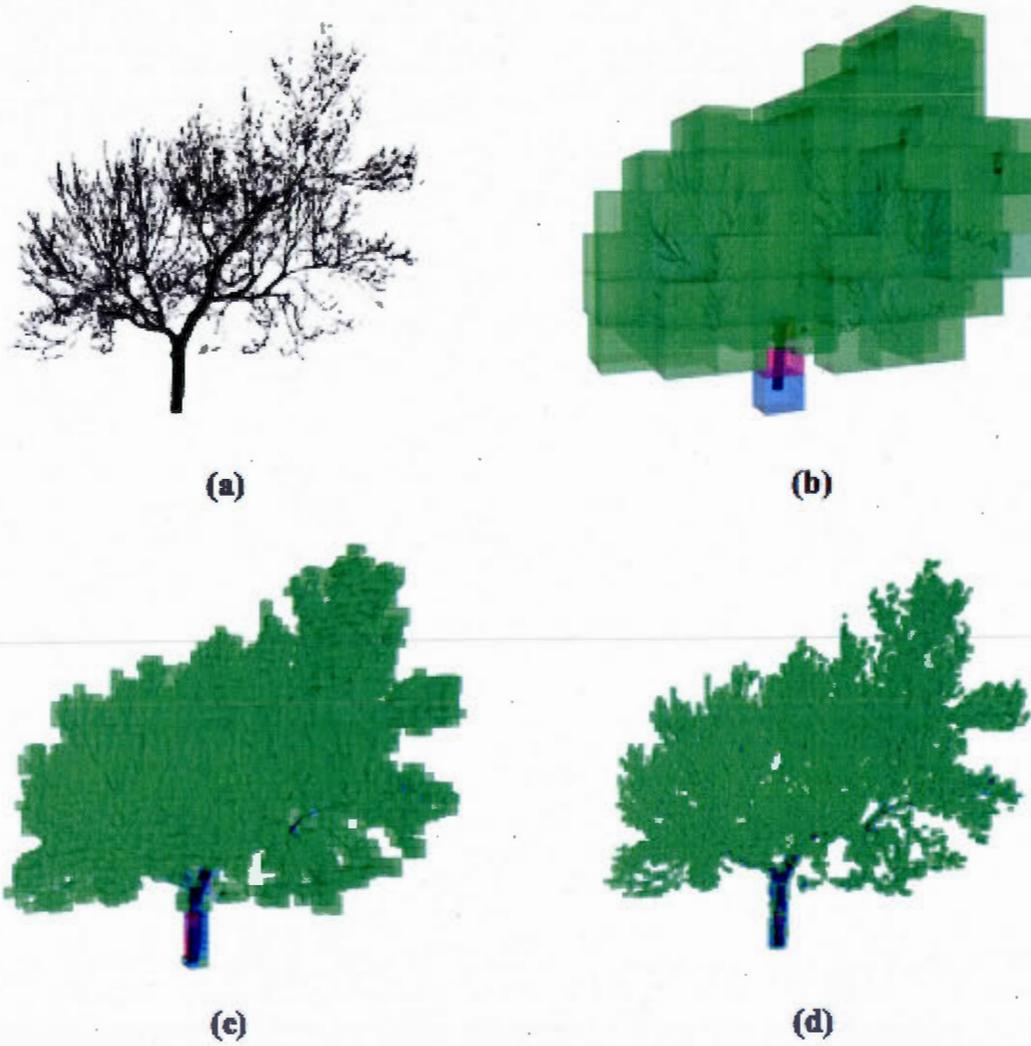
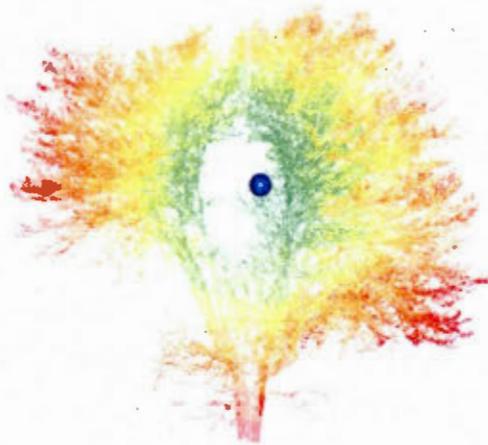


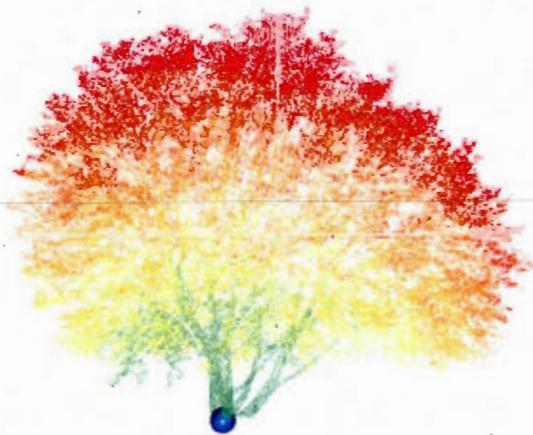
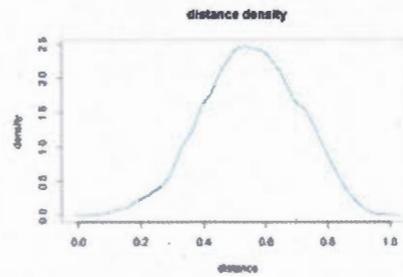
Figure 1.1 Exemple d'un nuage de points brut (a) voxelisé à 1 m (b), 0.2 m (c) et 0.1 m.

1.4.2 Dispersion tridimensionnelle des voxels

Les fonctions d'analyse de dispersion des voxels dans l'espace 3D offertes par la librairie VoxR permettent d'extraire de scènes LiDAR des descripteurs originaux décrivant certaines propriétés des nuages de points symptomatiques des caractéristiques structurales des arbres. Pour chacune des fonctions, une option permet la représentation graphique de la variable étudiée sous la forme d'une fonction de densité. La fonction « point.distance.dispersion » (Figure 1.2) est bien adaptée pour la description de scènes LiDAR d'objets de forme sphéroïde. Elle permet, en effet, de situer chacun des voxels sur le rayon d'une sphère dont le centre est un point de référence désigné par l'utilisateur (voir app. B.2 pour les appels de fonction). La Figure 1.2 donne deux exemples de l'application de cette fonction à des scènes LiDAR d'arbres, pour un point de référence correspondant à la moyenne des coordonnées de tous les voxels (a) et la base de la couronne (b). La fonction « axis.distance.dispersion » est, quant à elle, bien adaptée à la description d'objets de forme cylindrique ou allongée. Elle permet en effet de situer chacun des voxels sur le rayon d'un cylindre dont le centre est un axe défini par l'utilisateur (voir app. B.3 pour les appels de fonction). La figure 1.3 donne deux exemples d'utilisation de cette fonction avec comme axe de référence l'axe des z (a) ou l'axe des y (b). La fonction « axis.angle.dispersion » permet de calculer l'angle formé par un voxel et un axe du repère orthonormé défini par l'utilisateur. Une option permet de projeter le nuage de voxels dans un plan afin de réduire l'influence de la forme sphéroïde des arbres. La figure 1.4 montre l'angle des voxels par rapport à l'axe des Y, (a) sans projection et (b) avec projection dans le plan formé par les axes x et y du repère orthonormé. Lorsque le nuage de voxels n'est pas projeté les voxels sont référencés par une valeur d'angle correspondant à leur situation sur la voûte d'une hémisphère. Lorsque le nuage de voxels est projeté, une valeur d'angle, correspondant à la situation sur un disque du plan de projection, est attribuée à chaque voxel, il s'agit de la dispersion radiale des voxels.



(a)



(b)

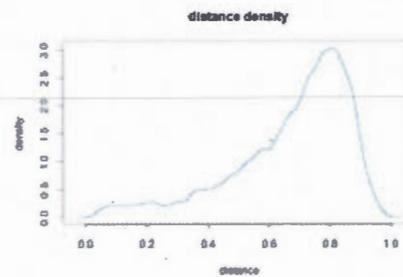
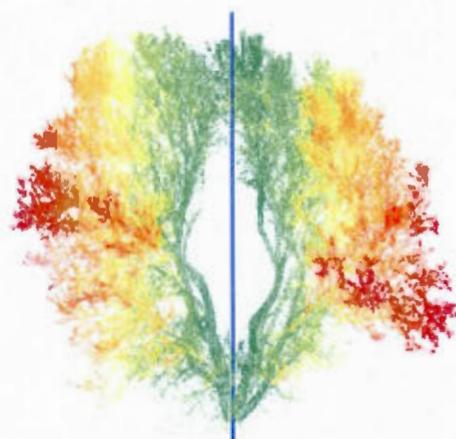
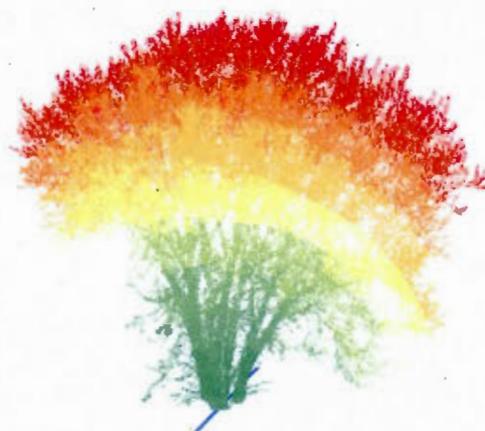
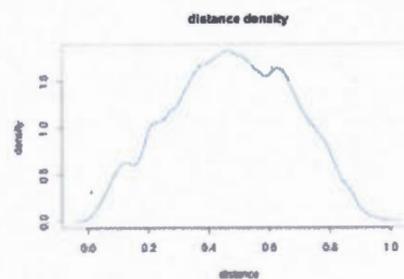


Figure 1.2 Exemple d'utilisation de la fonction « point.distance.dispersion ». (a) les coordonnées du point de référence sont définies comme étant la moyenne des coordonnées de tous les voxels. (b) les coordonnées du point de référence sont 0,0,0. Les sphères bleues représentent le point de référence. Pour (a) et (b) les graphiques de densité des distances sont tracés à droite.



(a)



(b)

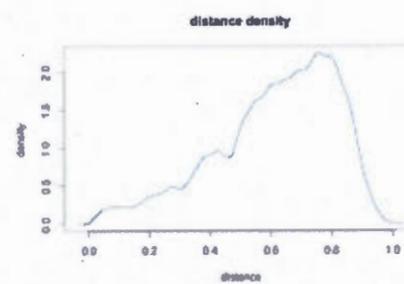


Figure 1.3 Exemples d'utilisation de la fonction « axis.distance.dispersion ». (a) l'axe de référence est l'axe des z. (b) l'axe de référence est l'axe des y. L'axe de référence est représenté en bleu. Pour (a) et (b) les graphiques de densité des distances sont tracés à droite.

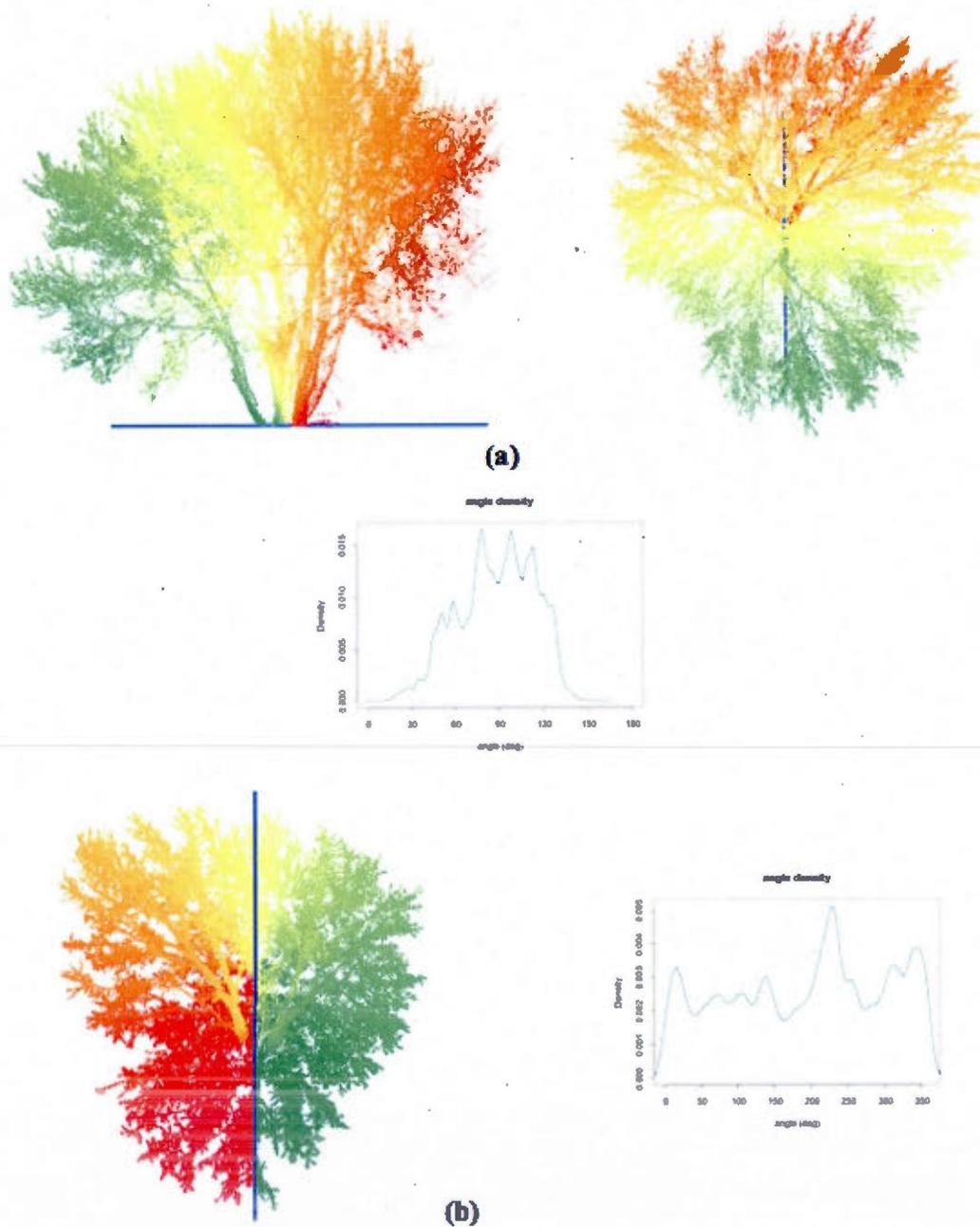


Figure 1.4 Exemples d'utilisation de la fonction « `axis.angle.dispersion` ». Dans les deux cas l'axe de référence est l'axe de y, représenté en bleu. (a) l'angle des voxels est calculé sans projection. En (b) l'angle est calculé avec projection dans le plan x,y. Pour (a) et (b) les graphiques de densité des distances sont tracés en bas pour (a) et à droite pour (b).

1.4.3 Densité de voxels projetés

La librairie VoxR propose la fonction « project » permettant la projection des nuages de voxels dans un plan du repère orthonormé (voir app. B.4 pour les appels de fonction). Cette analyse permet d'extraire des scènes LiDAR, des variables de densité d'exploration de l'espace. Le résultat de cette analyse résulte en une cartographie de l'objet étudié présentant pour chacun des pixels une valeur de densité. La Figure 1.5 donne plusieurs exemples de projection d'arbres dans deux plans différents : xy et xz selon deux modes de discrétisation des classes de densité calculées avec la fonction « levels » (voir app. B.5 pour les appels de fonction) : par quintile ou par classes de 20 % de la valeur maximale. Pour chacun des modes de discrétisation des classes, la projection de la densité de points et celle du nombre de voxels (Figure 1.5 (b) vs. (c) et (e) vs. (f)) présentent des résultats relativement similaires. Elles permettent une analyse de la densité de matériel, la position des points ou des voxels étant intimement liée à la situation du matériel ligneux de l'arbre dans l'espace 3D puis dans l'espace 2D après projection. Le rapport $n_{\text{vox}}/n_{\text{pts}}$ (Figure 1.5 (d), (g) et (j)) permet, quant à lui, de réaliser un diagnostic sur la concentration des points dans un volume de voxels donné. Une analyse visuelle des images présentant le rapport $n_{\text{pts}}/n_{\text{vox}}$ dont les classes sont définies par quintile permet de constater une discrétisation des pixels contenant un nombre de points important répartis dans un petit nombre de voxels. Et au contraire, des zones de faible densité présentant peu de points dans un grand nombre de voxels. Ce phénomène peut se retrouver, de façon moins constante, sur les projections du nombre de points et du nombre de voxels dont les classes sont définies par pourcentage (Figure 1.5 (c) et (b)). La Figure 1.6 présente plusieurs projections d'une scène LiDAR d'une plantation expérimentale dont le sol a été volontairement conservée. L'utilisation de la fonction « project » permet ici de réaliser une cartographie de la zone d'étude. Les résultats des projections (Figures 1.5 et 1.6) ont été réalisés à l'aide de la fonction « raster.projection » (voir app. B.7 pour les appels de fonction).

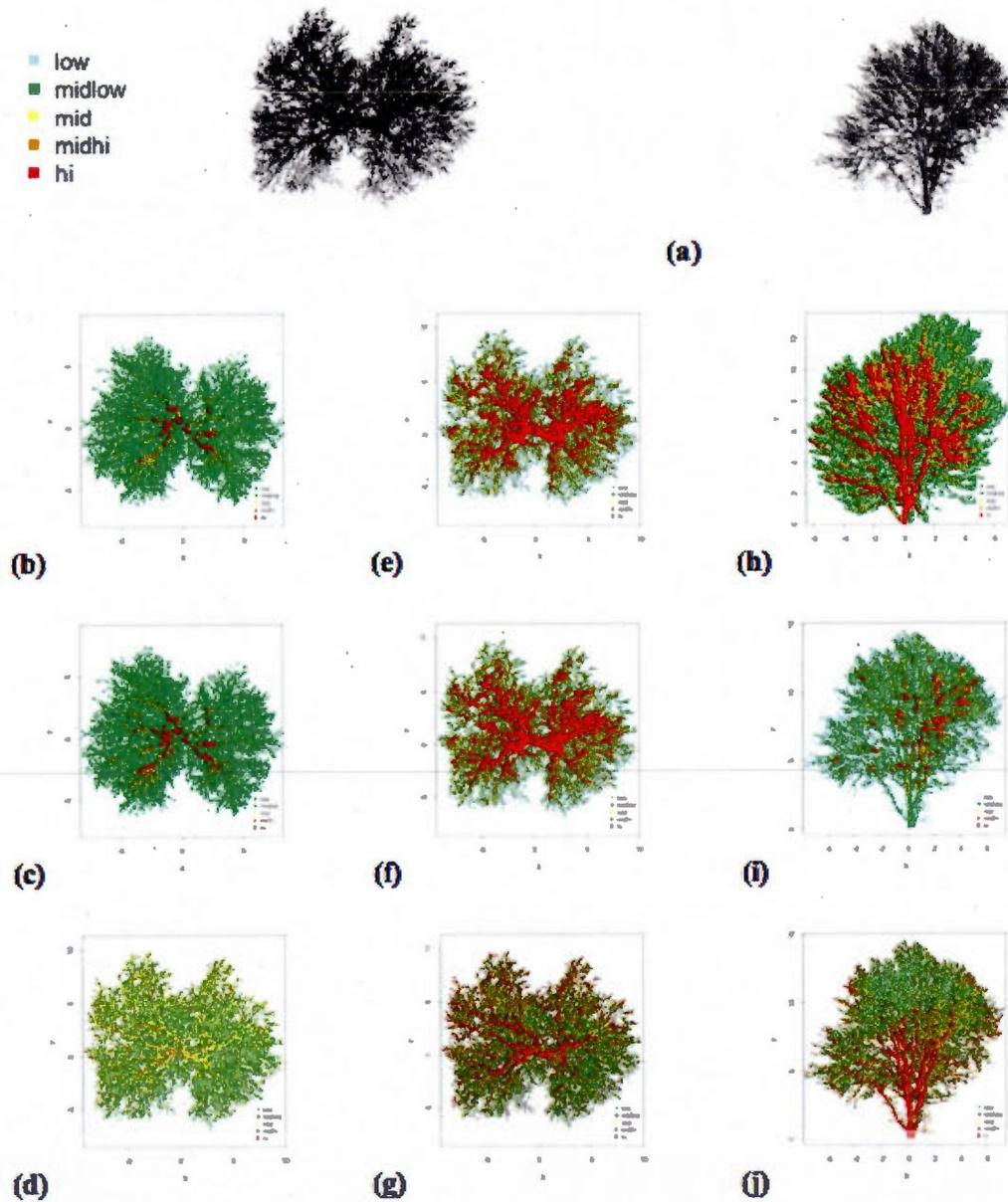


Figure 1.5 Exemples d'utilisation de la fonction « project », visualisé à l'aide de la fonction « raster.projection » pour la projection d'arbres. (a) nuages bruts vus perpendiculairement au plan de projection. (b) à (g) projection dans le plan x,y. (h) à (j) projection dans le plan x,z. (b), (e), (h) et (i) nombre de voxels (nvox). (c) et (f) nombre de points (npts). (d), (g) et (j) rotio npts/nvox. (b), (c), (d) et (i) classes définies par pourcentages (0.2). (e), (f), (g) et (h) classes définies par quintiles. La légende des classes de densité est présentée en haut à gauche.

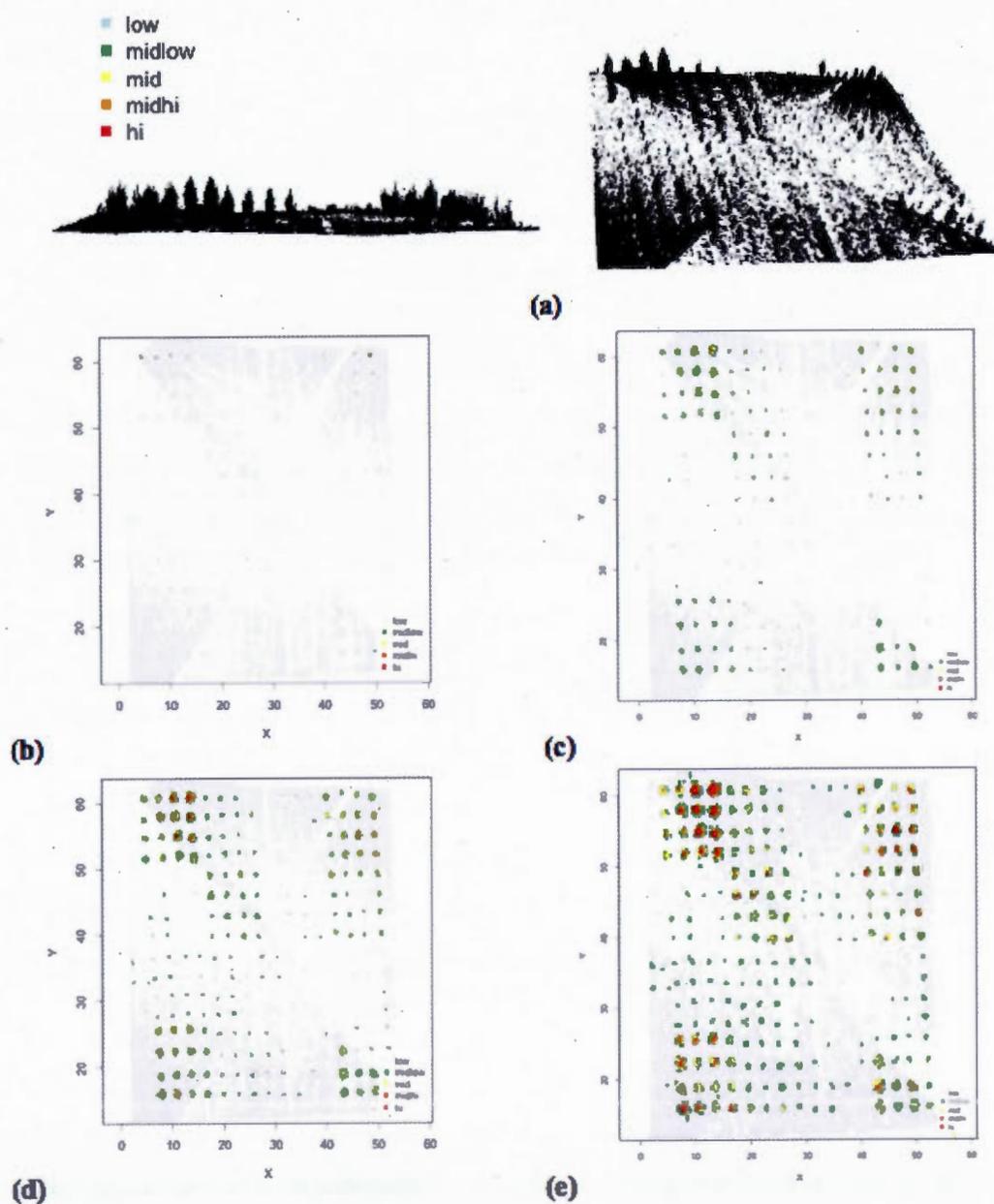


Figure 1.6 Exemples d'utilisation de la fonction « project », visualisée à l'aide de la fonction « raster.projection » pour la projection de la plantation. (a) nuage de points brut, en haut vu de 3/4, en bas vue de face. (b) projection du nombre de points (npts). (c) projection du nombre de voxels (nvox) d'une résolution $r = 0.1$. (d) nvox, $r = 0.2$. (e) nvox, $r = 0.4$. La légende des classes de densité est présentée en haut à gauche.

1.4.4 Comparaison entre deux scènes LiDAR

La fonction `subtract.objects` permet de comparer deux scènes LiDAR d'un même objet à des temps différents. La Figure 1.6 présente plusieurs exemples d'application de cette fonction pour un même arbre en utilisant des distances de recherche différentes. Une étude visuelle des résultats de la fonction « `subtract.object` » permet de constater que le nombre de voxels conservés varie fortement selon la distance de recherche (`dist.reaserch`) utilisée (voir app. B.8 pour les appels de fonction). La Figure 1.7 (a) et (c) montrent les résultats d'une même soustraction pour des distances de recherche différentes. Les deux scènes LiDAR utilisées correspondant à un même arbre avant et après une taille seuls les voxels correspondant à des branches supprimées (visibles en rouge sur la figure 1.7 (a)) devraient, en théorie, être retournés par l'algorithme. Cependant, des voxels correspondant à d'autres parties de la couronne sont conservés. Nous attribuons cette erreur à des défauts d'ajustement des scans et/ou à du bruit présent uniquement dans une des deux scènes LiDAR. L'utilisation d'une distance de recherche plus élevée permet de pallier partiellement à ce phénomène mais risque d'entraîner la suppression de voxels effectivement uniques à une seule des scènes LiDAR. Cependant, un nettoyage manuel est parfois possible afin d'éliminer les voxels résultant d'une erreur. Des erreurs similaires se retrouvent également sur les soustractions correspondant à cet arbre avant et après une année de croissance (Figure 1.7 (c)).

1.5 Discussion sur le choix de la résolution des voxels

Il n'existe pas de méthode systématique permettant le choix de la « meilleure » résolution. Cependant, des outils permettent de guider ce choix. Ces outils sont essentiellement basés sur une étude visuelle des scans et scènes LiDAR ou par l'observation des distributions de l'évolution du nombre de voxels et du volume calculé en fonction de la résolution. La distribution du nombre de voxels en fonction de la résolution choisie décrit un plateau pour les résolutions inférieures à la définition du nuage de points (Figure 1.9). Le nuage de points est alors parfaitement décrit. Cependant l'utilisation

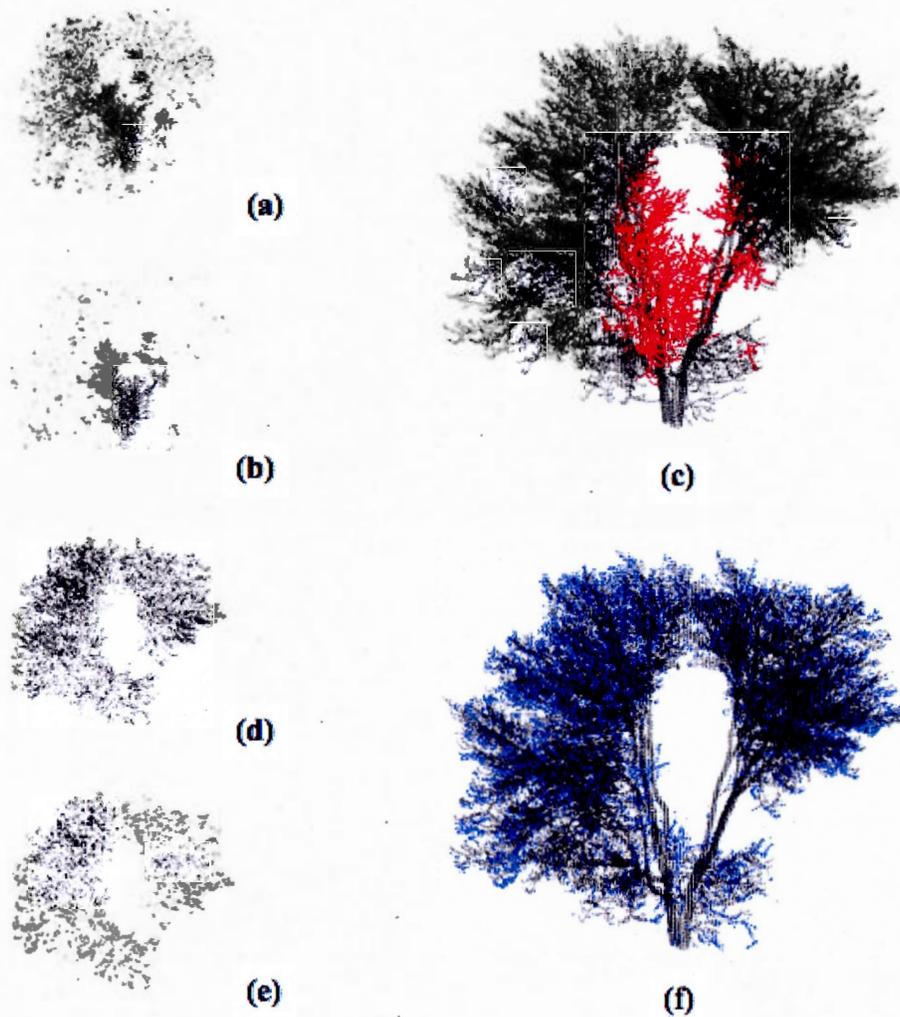


Figure 1.7 Exemples d'utilisation de la fonction « `subtract.objects` ». (a), (b) et (c) soustraction d'un arbre après taille à ce même arbre avant taille. (d), (e) et (f) soustraction d'un arbre à ce même arbre après une année de croissance. (a) `dist.reaserch` = 0.5, (b) `dist.reaserch` = 10. (c) similaire (b) remplacé sur l'arbre après taille. (d) `dist.reaserch` = 5, (e) `dist.reaserch` = 7, (f) similaire à (e) remplacé sur l'arbre avant une année de croissance.

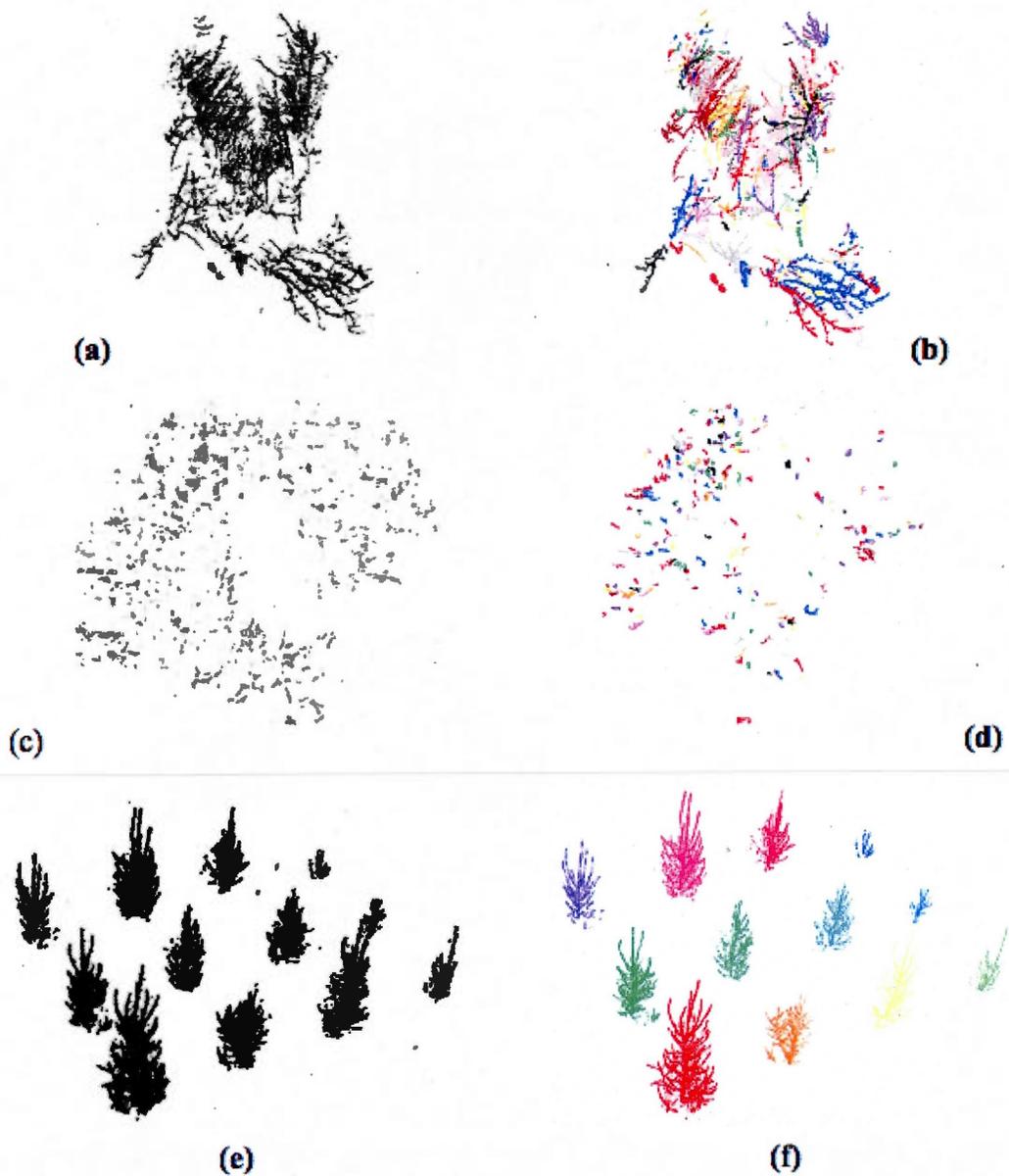


Figure 1.8 Exemple de l'utilisation de la fonction « `objets.reconuission` ». (a) nuage de points brut issu de la soustraction d'un arbre avant et après taille. (b) similaire à (a) après reconnaissance des objets, distance de recherche (`fac`) de 0.06. (c) nuage de point brut de la soustraction d'un arbre à ce même arbre après une année de croissance. (d) similaire à (c) après reconnaissance des objets, distance de recherche (`fac`) de 0.1. (e) nuage de points d'une partie de la plantation sans sol. (f) similaire à (e) après reconnaissance des objets, distance de recherche (`fac`) de 0.2.

de voxels d'une résolution inférieure à la définition du nuage de points conduit à sous-estimer le volume total exploré par l'arbre, la matrice de voxels présentant alors une discontinuité chronique dans la description de l'espace exploré par l'arbre, les voxels étant d'une taille insuffisante pour combler l'espace entre deux points. À contrario, plus la résolution choisie est grande, moins la structure fine du nuage de points est décrite en conduisant notamment à la présence de deux objets botaniques différents (branches, feuilles) dans un même voxel (Gorte et Pfeifer, 2004). Cependant, le choix d'une résolution élevée peut permettre de réduire l'influence des pertes d'information induites par des zones d'occlusion. La figure 1.10 montre la compensation des zones d'occlusions présentes sur le nuage de points brut (a) par l'utilisation de voxels d'une résolution de 0,2 m (b) et la compensation partielle de ces zones avec des voxels d'une résolution de 0,05 m (c). Enfin, l'utilisation de voxels semble à même de résoudre des problèmes liés à l'hétérogénéité de la densité de points induite, soit par une forte occlusion résultant de l'accumulation d'objets entre un objet et le capteur, soit par la nature sphérique de la prise de vue. Dans ce cas, l'utilisation des voxels peut permettre l'harmonisation de la densité du nuage de points représentant une zone spatialement étendue. La figure 1.6 montre la projection de la scène LiDAR d'une plantation expérimentale (a) selon le nombre de points (b) et avec l'utilisation de voxels de résolution 0.1 m (c), 0.2 m (d) et 0.4 m (e). La densité de points présente des zones de très forte densité proches des stations de prise de vues ayant pour conséquence de relayer l'ensemble de la scène dans la catégorie de faible densité. La densité des voxels semble, à priori, plus représentative de la répartition réelle du matériel dans l'espace 2D. L'utilisation de voxels permet de supprimer l'influence des zones de très forte densité de points et de reclasser les pixels de la projection dans toutes des classes de densité (figure 1.6 (c), (d) et (e)). Il semblerait également que l'utilisation de voxels de résolution différentes puissent faire varier les résultats. Par exemple, une résolution de 0.1 m (Figure 1.6 (b)) présente une discrimination moins efficace des pixels correspondant au sol et ceux correspondant à du matériel végétal que des résolutions plus grandes : 0.2 m ou 0.4 m (figure 1.6 (d) et (e) respectivement). La voxelisation peut permettre de réduire l'influence du bruit induit par la déviance du rayon ou la présence inopinée d'objets dans le champ de captation

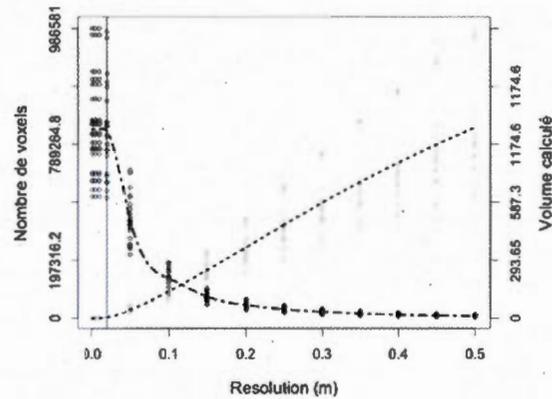


Figure 1.9 Graphique du nombre de voxels et du volume calculé en fonction de la résolution ajustés par une courbe « spline » de tendance. Le nombre de voxels est représenté par des cercles noirs ajustés et le volume calculé par des cercles gris. La droite verticale représente la définition minimale du nuage de points.

du LiDAR. L'utilisation de voxels permet en effet la réalisation d'un nettoyage de forte intensité visant à réduire le nombre de points correspondant à du bruit. Par exemple, une réduction de la définition du nuage de point induite par la suppression de points isolés (tel qu'effectuée dans cette étude) peut être compensée par l'utilisation de voxels de dimensions supérieures à la définition du nuage de points post-traitement. Enfin, la suppression de voxels contenant un faible nombre de points (Vonderach, 2012) peut permettre de supprimer les voxels mis en place par un point correspondant à du bruit.

1.6 Discussion générale

La librairie VoxR offre en premier lieu un panel d'outils algorithmiques permettant d'extraire des variables originales de nuages de points 3D LiDAR. Ces fonctions permettent une analyse de la dispersion des points dans l'espace 3D ou de porter un diagnostic sur la densité 2D de l'exploration de l'espace par les arbres. Nous pensons que ces fonctions peuvent être utilisées dans plusieurs contextes, dépassant celui de l'étude des arbres, nécessitant une étude fine de la dispersion spatiale d'objets numérisés sous

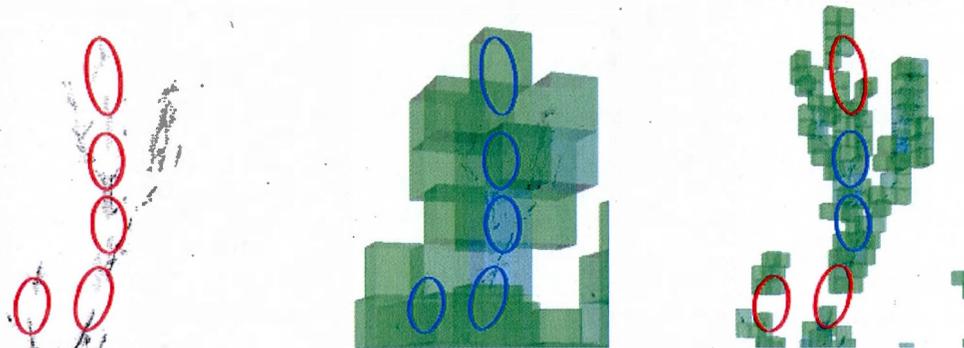


Figure 1.10 Le nuage de point LiDAR d'une branche isolée (à droite), au centre ce même nuage de points voxelisé à une résolution de 0.2 m et à droite à 0.05 m. Les ellipses rouges représentent des zones d'occlusion et les ellipses bleues ces mêmes zones d'occlusion compensées par la voxelisation.

la forme d'un nuage de points 3D. VoxR offre également la possibilité de comparer plusieurs scènes d'un même objet. Là encore, des applications différentes sont accessibles. Par exemple, nous pensons que la fonction « `subtract.objets` » peut permettre de détecter les imperfections des nuages de points LiDAR comme des problèmes liés à l'occlusion ou au bruit. Enfin, VoxR permet la reconnaissance d'objets spatialement différenciés offrant ainsi la possibilité de distinguer un grand nombre d'objets présents dans une même scène LiDAR.

La librairie ici présentée offre un algorithme de voxelisation de l'espace permettant d'intégrer un nuage de points LiDAR à une matrice de voxels. Plusieurs observations présentées dans ce document mettent en avant un certain nombre d'avantages que procure l'utilisation de voxels, notamment pour la description de nuages de points 3D imparfaits. Ils permettent notamment une uniformisation de la densité de points, une compensation partielle des zones d'occlusion (fortement dépendante de la résolution) et la réduction du bruit en permettant à la fois de réaliser un prétraitement important des scènes LiDAR entraînant une réduction de la densité de points et la suppression des voxels contenant un nombre faible de points. Cependant, l'utilisation de voxels, et no-

tamment lorsque ces derniers sont de grandes dimensions, peut entraîner une diminution de la descriptibilité de la structure fine du nuage de points. Une attention particulière doit donc être portée au choix de la résolution. Comme il n'existe, à l'heure actuelle, aucune méthode automatisée permettant d'effectuer ce choix, nous avons proposé un certain nombre de préconisations basées sur des observations visuelles. Notre conviction est que le choix d'une résolution repose essentiellement sur l'expérience de l'utilisateur et doit se faire en concordance avec les hypothèses posées. Nous pensons qu'il consiste essentiellement en un compromis entre, d'un côté, le choix d'une résolution permettant une description fine de la structure des nuages de points, et de l'autre, la réduction des erreurs liées aux problèmes de bruit et d'occlusion.

Enfin, nous tenons à rappeler, dans une optique de comparaison entre plusieurs nuages de points, l'importance de la réalisation d'un prétraitement de ces derniers, et notamment, celle de la normalisation de l'orientation spatiale des objets.

CHAPITRE II

EFFETS DES TAILLES DE DÉGAGEMENT DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES SUR L'EXPLORATION DE L'ESPACE PAR LA COURONNE D'ÉRABLES ARGENTÉS (ACER SACCHARINUM) À PARTIR DE DONNÉES T-LIDAR

- Bastien Lecigne, auteur principal : Centre d'étude de la Forêt, Département des Sciences Biologiques, Université du Québec à Montréal, C.P. 8888, Succ. Centre-Ville, Montréal, Canada, H3C 3P8. mail : lecignebastien@gmail.com ; Fax : (514) 987 4647 ; Tel : (514) 987 3000 6936
- Sylvain Delagrangé : Centre d'étude de la Forêt, Institut des Sciences de la Forêt Feuillue Tempérée, Département des Sciences Naturelles, Université du Québec en Outaouais, C.P. 8888, Succ. 58 rue Principale, Ripon (Québec) Canada J0V 1V0. mail : sylvain.delagrangé@uqo.ca.
- Christian Messier : Centre d'étude de la Forêt, Département des Sciences Biologiques, Université du Québec à Montréal, C.P. 8888, Succ. Centre-Ville, Montréal, Canada, H3C 3P8. mail : messier.christian@uqam.ca.

Résumé

À Montréal, de nombreux arbres de rues sont en interaction avec les réseaux de distribution électrique d'Hydro-Québec. Cette cohabitation impose au distributeur l'obligation de réaliser des interventions régulières d'émondage afin de dégager ses réseaux. Malheureusement, les impacts de ces interventions sur le fonctionnement et l'architecture des arbres sont encore méconnus. Afin d'étudier l'impact de ces émondages sur les arbres urbains, nous proposons une méthodologie de télédétection originale basée sur l'acquisition et l'analyse de données LiDAR terrestre. Cette méthode repose sur la voxelisation du nuage de points constituant les scènes LiDAR. Le volume des arbres, la dispersion et la densité des voxels (intimement liée à la position du matériel ligneux) ont été extraits et comparés selon cinq catégories d'arbres : arbres témoins, arbres soumis aux émondages depuis plusieurs années, avant et après intervention, et l'ensemble de ces arbres après une année de croissance ($N = 10$, 5 arbres témoins et 5 arbres taillés). Les résultats démontrent des modifications à long terme : modification du rapport volume de la couronne/DHP, modifications de la répartition du matériel, augmentation de la saturation de l'espace dans la couronne d'arbres taillés. Il semble également que les arbres réussissent à compenser les pertes induites par les émondages après une année de croissance. Enfin, à partir de nos observations et des connaissances issues de la littérature, nous proposons un système théorique mettant en interaction des caractéristiques et mécanismes des arbres leur permettant de réagir aux tailles de dégagement des réseaux électriques. Cette étude aura donc permis d'établir une nouvelle méthode d'analyse des arbres à partir de données LiDAR et de proposer une base théorique pour l'étude de la problématique abordée.

Mots clefs : tailles, réseaux électriques, exploration de l'espace, Érables argentés, T-LiDAR.

2.1 Introduction

À Montréal, de nombreux arbres urbains sont situés sous les réseaux électriques. Cette cohabitation résulte en un conflit dans l'occupation de l'espace aérien entre la couronne des arbres et les fils électriques. Ainsi, la présence de ces arbres est souvent perçue comme problématique car environ 11 % des pannes d'électricité sont causées par des branches en contact avec les conducteurs (Hydro-Québec, 2010). Afin de préserver l'intégrité de ses réseaux de conduction électrique, Hydro-Québec mandate des entreprises d'émondage dans la perspective de réaliser des tailles visant à dégager un espace, défini par des normes (Hydro-Québec, 2009), autour des réseaux. Selon la position de ces derniers par rapport à l'arbre, plusieurs cas de figure peuvent se présenter (Millet et Bouchard, 2003). L'un d'eux, la taille « unidirectionnelle en V » se présente lorsque les arbres sont situés directement à l'aplomb des fils. Les interventions de taille consistent alors à supprimer des branches présentes dans la partie centrale de la couronne, autour des réseaux électriques. Ce type de taille entraîne une très forte réaction des arbres qui mettent alors en place des réitérations traumatiques dans le centre de leur couronne. Cette « recroissance » souvent très vigoureuse (Goodfellow et al. 1987) et non hiérarchisée (Millet et Bouchard, 2003), menacent les fils électriques après quelques années de croissance et imposent de tailler les arbres à nouveau. Les interventions d'émondage prennent alors la forme de cycles, d'une durée allant de trois à quatre saisons de croissance, débutant au moment de la taille et se terminant à la taille suivante. Ces pratiques souvent mal perçues par les riverains en raison de leur caractère inesthétique (Kuhns et al., 2007) et entraînent des coûts économiques très importants pour les distributeurs et les gestionnaires (Miller et Sylvester, 1981 ; Browing et Wiant 1997).

Les arbres sont des organismes modulaires (Hallé et al., 1978 ; Barthélémy et al., 2007) qui édifient leur structure par la répétition génétiquement programmée d'éléments structuraux élémentaires. Ce mode de développement par « réitération » (Hallé, 1986 ; Oldeman, 1974 ; Hallé et Oldeman, 1978 ; Castro e Santos, 1980 ; Barthélémy et Caraglio,

2007) conduit à la constitution d'une colonie hiérarchisée d'unités réitérées, présentant des variations au cours de son développement. Dans ce contexte, les réitérations traumatiques constituent une réponse à des traumatismes ayant des conséquences sur l'intégrité structurelle des arbres. C'est le cas de la taille qui en entraînant la suppression de branches est un facteur important de modification de l'interception lumineuse (Stephan et al., 2008) et de la performance photosynthétique des arbres (Pinkard et al., 1998 ; et Pinkard et Beadle 1998a). L'intensité de la taille, les conditions environnementales, la santé de l'arbre (Marquier et Balandier, 2000) et son stade physiologique (Raimbault et al., 1995) conditionnent la réponse des arbres aux tailles ; ainsi une forte taille peut mener à une réduction de l'accroissement du volume de la couronne (Pinkard et Beadle, 1998b). Suite à un émondage, l'essentiel de la réponse des arbres consiste en la mise en place de réitérations traumatiques. La proportion de ces rejets dans la couronne augmente (Millet et Bouchard, 2003) avec l'intensité de la taille et leur position paraît être influencée par la disponibilité en lumière au sein de la couronne (Pinkard et al., 1998 ; Pinkard et Beadle, 1998b ; Stephan et al., 2007 et 2008). Dans le cas d'arbres vigoureux, la croissance de ces rejets peut supplanter celle d'arbres non taillés (Marquier et Balandier, 2000). Chez de nombreuses espèces, dont l'Érable argenté, cette réaction est vive la première année consécutive à la taille et diminue au fil du temps (Goodfellow et al. 1987). Ainsi, les réitérations traumatiques permettent de compenser efficacement les pertes en terme de nombre de branche plutôt qu'en terme de biomasse (Rasmussen, 2005).

Les effets des interventions de taille sur la mise en place et la croissance de réitérations traumatiques sont bien connus. Cependant, nous pensons que des tailles de forte intensité, réalisées de façon régulière peuvent entraîner une réaction des arbres dans l'ensemble de leur couronne. Afin d'étudier l'impact des tailles unidirectionnelles en « V » sur la couronne d'Érables argentés, nous proposons une approche basée sur l'acquisition et l'analyse de données T-LiDAR, permettant la prise en compte de l'ensemble de leur couronne. Afin de fixer le cadre de cette étude nous posons les hypothèses suivantes : (i) la taille unidirectionnelle en « V » entraîne une forte modification des

modalités d'exploration de l'espace par la couronne des arbres ; (ii) suite à une intervention de taille, les arbres réagissent en mettant en place des répétitions traumatiques, ces dernières ne parvenant cependant pas à compenser les pertes de branches ; (iii) la taille a un effet direct sur le volume de la couronne et entraîne sur le long terme une diminution significative du volume d'espace exploré par la couronne.

2.2 Matériel et méthode

L'échantillonnage dont nous disposons est constitué de neuf Érables argentés (*Acer saccharinum*) situés en milieu urbain, dans la ville de Montréal, Québec, Canada (Tableau 2.1). Quatre de ces arbres sont situés sous les réseaux électriques et subissent des cycles d'émondages destinés à dégager et à sécuriser les lignes. Les cinq autres sont libres de fils. Des scans LiDAR ont été réalisés en trois temps en dehors de la période végétative lorsque les arbres n'avaient pas de feuilles à l'aide d'un capteur Ilris 3d. Le temps 1 (t_0 pour les arbres taillés, t_e pour les arbres témoins) a été réalisé en novembre 2010 et concerne les neuf arbres de cette étude. Le temps 2 (t_t) a été réalisé sur les arbres taillés en février 2011 suite à l'émondage des arbres situés sous les réseaux électriques. Au troisième temps (t_{t+1} pour les arbres taillés et t_{e+1} pour les arbres témoins), tous les arbres ont été scannés après une saison de croissance en décembre 2011 et janvier 2012. À chaque temps, les prises de données ont été effectuées de manière à réaliser une triangulation autour de chacun des arbres, ce qui permet de réduire les phénomènes d'occlusion (Coté et al. 2011). Les trois scans correspondant à un même arbre et à un même temps ont ensuite été alignés à l'aide du logiciel par un rapprochement manuel basé sur la reconnaissance de points communs aux trois scans, complété par un ajustement automatique résultant en un alignement optimal des scans. Les retours lasers correspondant à l'environnement ont ensuite été supprimés de la scène LiDAR résultante afin de ne conserver que les points correspondant à l'arbre. L'orientation spatiale des scènes LiDAR et leur positionnement dans le repère orthonormé de référence a ensuite été normalisé pour l'ensemble de l'échantillonnage. Ainsi, l'axe des Z a été placé au zénith, l'axe des Y est parallèle à la rue et aux réseaux électriques et l'origine a été

positionnée sur le tronc au niveau du premier embranchement. Enfin, un nettoyage a été réalisé dans le but de supprimer le bruit. Il repose sur la conservation d'un point unique dans une sphère de 2cm de diamètre puis la suppression de tout point isolé à plus de 5cm de tout autre point. L'ensemble des scènes LiDAR ont en premier fait l'objet d'une voxelisation permettant la création d'une matrice de voxels d'une résolution de 5 cm ajustant les nuages de points. Il est à noter que seuls les voxels contenant plus de trois retours LiDAR ont été conservés afin de s'assurer qu'ils ne soient pas le fait du bruit. Les nuages de voxels ont ensuite été analysés à l'aide des algorithmes du package VoxR ou des bibliothèques déjà existantes, à savoir :

1. Des découpages polynomiaux ont été réalisés sur les distributions des voxels en fonction de l'axe des X du repère orthonormé (correspondant à la largeur de l'arbre, perpendiculaire à l'axe des fils) à l'aide de la fonction `mixdist` disponible dans le package R « `mixdist` » (Macdonald et Du, 2011). Pour chaque arbre t_0 , t_1 et t_2 trois distributions normales ont été ajustées. La première (D1) décrit la partie négative de l'axe des X (à l'Est des fils), la seconde (D2) sa partie centrale et la troisième (D3) sa partie positive (à l'Ouest des fils). Cette analyse permet pour chacune de ces distributions ajustées (Dn) d'étudier la proportion (p_i) de la variable originale qu'elle contient.
2. L'angle de chacun des voxels, projeté dans le plan xy, par rapport à l'axe des Y (correspondant à l'axe des fils et de la rue) a été calculé via la fonction « `axis.angle.dispersion` » (voir Section 1.3.2 et 1.4.2). Il permet d'étudier la dispersion radiale des voxels par rapport au tronc et de décrire leur orientation.
3. La distance de chacun des voxels par rapport au point central de la couronne a été calculée à l'aide de la fonction `point.distance.dispersion` (voir section 1.4). Les coordonnées du point central sont définies comme étant la moyenne des coordonnées de l'ensemble des voxels constituant l'arbre.
4. La saturation de l'espace a été calculée en se basant sur la fonction `project` (voir section 1.3.2 et 1.4.3). Les nuages de voxels de chacun des arbres ont été projetés dans un plan XY. Le calcul de la saturation de l'espace (Sat) consiste en la nor-

malisation du nombre de voxels (n_{vox}) dans chacun des pixels de l'image raster par le biais d'un potentiel voxel (P_{vox}). P_{vox} correspond au nombre maximal de voxels qui peut être mis en place dans un pixel en fonction des dimensions de l'arbre, sa hauteur dans ce cas. $\text{Sat} = n_{\text{vox}} / P_{\text{vox}}$.

5. Un algorithme de soustraction (voir section 1.3.2 et 1.4.4) a été utilisé afin de calculer le volume d'espace et la situation des pertes induites par la taille et la croissance ayant lieu après celle-ci avec une distance de recherche ($n_{\text{vox.research}}$) de 5. Ainsi, pour les arbres taillés la soustraction des scènes correspondant aux temps t_0 et t_t permettent d'isoler les voxels correspondant aux pertes induites par la taille. La croissance étant calculée en soustrayant les scènes correspondant au temps t_t pour les arbres taillés et t_e pour les arbres témoins à celles correspondant au temps t_{t+1} ou t_{e+1} respectivement.
6. Le rapport volume total, correspondant au nombre de voxels de résolution volumique $r^3 = 0.000125 \text{ m}^3$ a été calculé pour chaque arbre. Ce calcul donnant lieu à la création d'un indicateur du volume normalisé par le DHP de l'arbre : volume total exploré / DHP permet une comparaison entre des arbres de DHP différents.

2.3 Résultats

2.3.1 Morphologie de la couronne

Dans un premier temps des découpages polynomiaux (Tableau 2.1 et Figure 2.1) ont été réalisés dans la perspective de mettre en évidence des modifications dans la dispersion latérale du volume (perpendiculairement à l'axe des fils) dans la couronne des arbres taillés. Les distributions latérales (D1 et D3) présentent des valeurs de π (proportion de la variable contenue dans une distribution ajustée) significativement supérieures chez les arbres taillés que chez les arbres témoins (ANOVA t_e vs. t_0 , $p = 0,0013$ pour D1 et $p = 0,0053$ pour D3; et t_e vs. t_t $p < 0,0001$ pour D1 et $p = 0,0001$ pour D3). Au contraire, les distributions centrales (D2) présentent des valeurs de π plus importantes dans le cas des arbres témoins (ANOVA t_e vs. t_0 , $p = 0,0002$ et t_e vs. t_t $p < 0,0001$). Ceci démontre une concentration des voxels très importante

Tableau 2.1 Informations sur les arbres et les indicateurs calculés

ID	Type	Temps	DHP (cm)	Volume (m ³)	Volume / DHP	Indicateurs							Dier. Sph.				Kurt _t	Sym _t	Kurt _s	Sym _s
						D1	D2	D3	N	O	S	E	Kurt _t	Sym _t	Kurt _s	Sym _s				
1	Ta	t0	62	57,20312	0,922631	62,51	0,0002	37,49	17,1	36,59	18,66	33,65	-0,5605	-0,2026	6,8621	2,3832				
2	Ta	t0	50,7	38,81975	0,7656755	41,58	2E-06	58,42	14,1	27,32	14,8	43,69	-0,7247	-0,2341	6,0474	2,3369				
3	Ta	t0	74,1	57,45987	0,7754369	40,19	21,66	38,14	8,17	32,75	27,04	32,03	-0,6684	-0,1318	6,8523	2,4453				
4	Ta	t0	54,3	45,03	0,8292818	32,07	27,99	39,94	26,9	24,82	19,85	28,41	-0,6656	-0,3088	2,6246	1,7635				
	Ta	t0	-	-	0,823	44,0	12,41	43,5	16,5	28,8	20,0	34,4	-0,643	-0,2156	4,7684	2,0763				
	Ta	t0	-	-	±0,07	±13	±14,56	±10	±7,81	±3,5	±5,11	±6,54	***	***	***	***				
1	Ta	t1	62	40,57825	0,6544879	58,01	0,0001	41,99	15,25	34,34	14,29	36,11	-0,5551	-0,2732	9,4992	2,8182				
2	Ta	t1	50,7	38,58713	0,7610873	42,88	0,0002	57,12	14,43	29,57	11,12	44,88	-0,5466	-0,2411	3,1191	1,8085				
3	Ta	t1	74,1	55,743	0,7522672	49,43	3E-06	50,57	6,14	36,16	25,64	32,04	-0,6534	-0,1113	3,7985	1,9183				
4	Ta	t1	54,3	36,08838	0,664611	40,77	15,71	43,52	21,52	29,55	12,5	36,39	-0,8266	-0,1826	2,1559	1,6702				
	Ta	t1	-	-	0,708	47,7	3,93	48,3	14,3	32,4	15,9	37,3	-0,6349	-0,1926	3,5588	1,8718				
	Ta	t1	-	-	±0,056	±7,75	±7,85	±6,97	±6,31	±3,37	±6,62	±5,38	***	***	***	***				
1	Ta	t+1	64,1	51,92963	0,8101346	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
2	Ta	t+1	51,9	48,5155	0,9351484	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
3	Ta	t+1	76,7	62,00083	0,8082497	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
4	Ta	t+1	54,7	48,12825	0,8792154	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
	Ta	t+1	-	-	0,858	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
	Ta	t+1	-	-	±0,061	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
5	Te	t0	56,5	44,3775	0,7854425	17,01	49,89	33,1	21,73	28,13	28,17	21,97	-0,5101	-0,4406	5,7996	2,2832				
6	Te	t0	63,5	48,81037	0,7686673	14,89	62,31	22,8	7,78	24,48	47,59	20,15	-0,2546	-0,4652	6,1969	2,3125				
7	Te	t0	62,5	50,58962	0,8120325	23,87	58,21	17,93	26,04	23,08	26,07	22,79	-0,5985	-0,2257	7,0051	2,4059				
8	Te	t0	64,5	56,96487	0,8831763	11,82	74,83	13,34	22,87	20,96	28,54	27,63	-0,4673	-0,358	5,6806	2,2343				
9	Te	t0	58,5	54,11141	0,9018568	15,63	55,04	29,33	18,42	15,83	37,71	32,02	-0,0037	-0,1665	3,4104	1,9381				
	Te	t0	-	-	0,83	16,6	60,06	23,3	19,3	22,8	32,8	24,9	-0,4464	-0,3208	5,0753	2,1147				
	Te	t0	-	-	±0,059	±4,46	±9,42	±3,61	±7,04	±4,7	±8,72	±4,84	***	***	***	***				
5	Te	t+1	58,1	56,48975	0,9724522	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
6	Te	t+1	65,2	52,00038	0,797518	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
7	Te	t+1	63,34	53,1245	0,8387196	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
8	Te	t+1	66,5	53,3775*	0,802669*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
9	Te	t+1	60	49,7181*	0,828635*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
	Te	t+1	-	-	0,869**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
	Te	t+1	-	-	±0,091	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				

* Arbres éliminés suite à des interventions de taille sortant du cadre de cette étude
 ** Résultat calculé sans tenir compte des valeurs marquées par *

dans les parties latérales de la couronne des arbres taillés (88% pour t0 et environ 96% pour tt) contrairement aux arbres témoins dont les fortes concentrations de voxels sont rencontrées dans la partie centrale de la couronne (60% en moyenne pour te). L'axe des fils semble donc jouer un rôle déterminant dans la dispersion du matériel des arbres soumis à la taille.

Afin de vérifier l'exactitude de cet énoncé, la dispersion radiale des voxels par rapport à l'axe des fils a été calculée (Tableau 2.1). Pour ce faire, nous considérons ici que les conducteurs électriques suivent un axe Nord/Sud. L'angle formé par chacun des voxels et l'axe des Y du repère orthonormé a été calculé. Les voxels ont ensuite été classés en quatre classes : N (Nord), S (Sud), E (Est) et O (Ouest) qui ont été rapportées en proportion du volume total de l'arbre. Les arbres témoins présentent une différence significative entre la proportion de voxels présents au nord (N) et au sud (S) du tronc, concentrant en moyenne environ 19.3% et 32% du total de voxels respectivement (ANOVA, $p = 0.0278$). Les classes E et O, quant à elles, apparaissent comme intermédiaires puisque aucune différence significative n'apparaît avec les classes N et S. Les classes O et E concentrent respectivement 24.9% et 22.9% du total des voxels (Tableau 2.1). Les arbres taillés, quant à eux, présentent une forte concentration de voxels dans les classes Ouest (O) et Est (E) ; respectivement 32.4% et 30.8% pour les arbres t0 et 34.9% et 33.3% pour les arbres tt. Des différences significatives apparaissent d'ailleurs au sein des arbres taillés entre les classes O et S, O et N, E et N et E et S (seulement pour tt). La comparaison des classes d'angles entre arbres taillés et arbres témoins présente des différences significatives pour les classes S ($p = 0.022$ pour t0 vs. te et $p = 0.0125$ pour tt vs. te) et O ($p = 0.0094$ pour tt vs. te). Il semblerait donc que la nature bilatérale de la couronne des arbres taillés leur interdise de coloniser l'espace au sud du tronc, ce qui semble être le mode de développement préférentiel des arbres témoins.

La distance des voxels au centre de la couronne a été calculée. Elle permet d'analyser la position des voxels sur le rayon d'une sphère. Ainsi, chaque voxel se voit attribuer une distance, ramenée en proportion de la valeur du 99 percentile de la distance

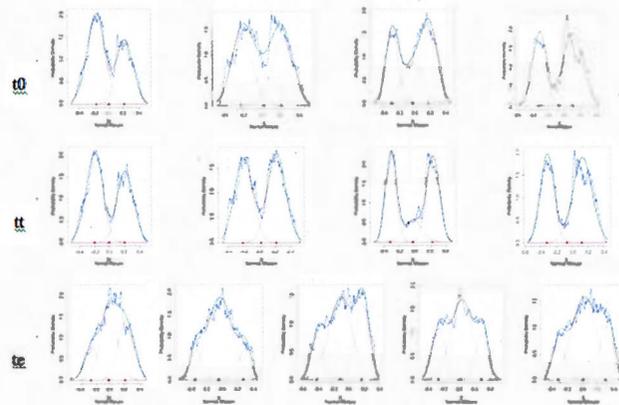


Figure 2.1 Découpages polynomiaux réalisés sur les arbres t0, tt et te. En bleu : distribution de fréquences du nombre de voxels en fonction de la largeur de l'arbre (X). En vert : ajustement du modèle de découpage polynomial. En rouge les distributions ajustées. Les triangles rouges sur l'axe des X indiquent la position de la médiane des distributions ajustées ; de gauche à droite : D1, D2, D3.

maximale. Une valeur de 0 correspond au centre de la couronne, une valeur de 1 à sa périphérie. La figure 2.2 présente les courbes de densité pour les catégories t0, tt et te. Les coefficients de kurtose et de symétrie des distributions de fréquence de la distance au centre de la couronne ont été comparés pour chaque type d'arbres (Tableau 2.1). Que ce soit pour les arbres te, t0 ou tt les valeurs des coefficients de kurtose et de symétrie sont tous négatifs et proches de 0 (kurtose : -0,643 pour t0, -0,6349 pour tt et -0,4464 pour te ; symétrie : -0,2156 pour t0, -0,1926 pour tt et -0,328 pour t0). Ceci démontre la centralité et la relative homogénéité des distributions, proches d'une distribution normale. En moyenne, les arbres t0 et tt présentent un coefficient de symétrie supérieur à celui des arbres te. Un coefficient de symétrie plus fort, se rapprochant de 0, implique un recentrement des distributions autour de la valeur moyenne. Il semblerait donc que les arbres taillés présentent une plus grande proportion de voxels dans la partie médiane de leur couronne que les arbres te. Le coefficient de kurtose est, quant à lui, en moyenne moins élevé chez les arbres taillés (t0 et tt) que chez les arbres témoins. Un coefficient

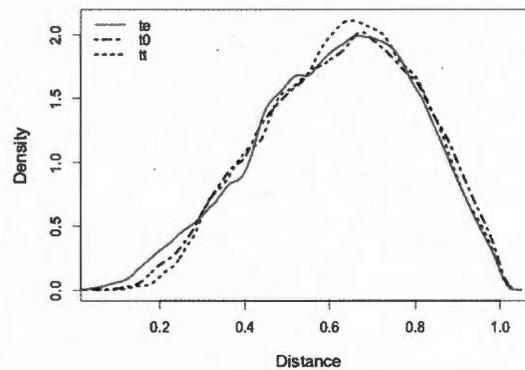


Figure 2.2 Graphiques de densité des distributions des voxels en fonction de leur distance au centre de la couronne pour les catégories t0, tt et te.

de kurtose bas implique une dispersion plus homogène. Les arbres taillés présentent une homogénéisation de la distribution du matériel dans leur couronne. Ceci implique une influence de la taille menant à une augmentation plus graduelle de la proportion de matériel du centre vers la périphérie de la couronne.

Enfin, la saturation de l'espace dans la couronne des arbres a été calculée. Cet indicateur décrit la densité de voxel de chacun des pixels d'une projection des nuages de voxels dans le plan xy. La saturation de l'espace est calculée comme étant la densité de voxels normalisée par un potentiel voxels correspondant au nombre maximal de voxels pouvant être mis en place dans une colonne de voxels selon les dimensions de l'arbre. Les coefficients de kurtose et de symétrie de l'ensemble des catégories d'arbres (Tableau 2.1) sont positifs et élevés (kurtose : 4,7684 pour t0, 3,5588 pour tt et 5,0753 pour te; symétrie : 2,0763 pour t0, 1,8718 pour tt et 2,1147 pour te). Ceci démontre une très forte asymétrie des distributions vers les petites valeurs de saturation de l'espace et une très forte concentration au tour de ces valeurs (Figure 2.3). En moyenne les arbres tt présentent un coefficient de kurtose inférieur à celui des arbres t0 et te, ce qui dénote d'une tendance des arbres tt à une uniformisation de la saturation de l'espace.

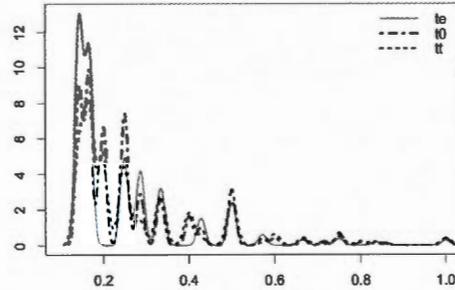


Figure 2.3 Graphiques de densité de la saturation de l'espace des projections des nuages de voxels dans le plan xy pour les catégories t0, tt et te.

Le fait que les arbres t0 soient très proches des arbres te implique que la taille soit réalisée dans des zones de faible saturation de l'espace. Ces observations se retrouvent lors de l'étude des coefficients de symétrie. Les arbres tt présentent en moyenne des coefficients de symétrie inférieurs aux arbres t0 et te. Ceci implique un décalage des distributions de saturation de l'espace vers les hautes valeurs ; ce qui confirme le fait que la taille soit réalisée dans des zones de faible densité. Cependant, d'une façon générale les arbres taillés présentent une augmentation de la saturation de leur couronne par rapport aux arbres témoins se traduisant par une diminution des coefficients de kurtose et de symétrie. Il semblerait donc que les arbres taillés présentent une légère augmentation de la saturation de l'espace dans la partie de leur couronne ne subissant pas d'intervention d'émondage, cette différence étant plus accrue chez les arbres après interventions de taille (tt).

2.3.2 Pertes induites par la taille et recroissance

Afin d'estimer le volume d'espace exploré par les branches supprimées lors de la taille et la croissance mise en place par les arbres suite à cette dernière, l'algorithme

de soustraction a été mis en application. Cet algorithme permet par la soustraction des scènes LiDAR au temps t_t à celle du temps t_0 d'isoler, pour les arbres taillés, les voxels correspondant à des branches élaguées. De la même façon, la soustraction des scènes LiDAR au temps t_e et t_{e+1} pour les arbres témoins et t_{t+1} et t_t pour les arbres taillés permet d'isoler les voxels correspondant à des branches issues de la croissance (Tableau 2.2). Les pertes induites par les tailles correspondent en moyenne à 12,79% du volume total de la couronne au temps t_0 . Cependant, un arbre ayant perdu une proportion très importante de branches (27,12%) semble ne pas être comparable au reste de l'échantillonnage, la moyenne des pertes étant de 8,01% lorsqu'il n'entre pas dans son calcul. Il semblerait donc qu'une grande variabilité dans la façon dont les interventions de taille sont réalisées, ou dans la forme des arbres, puissent induire de fortes variations dans les estimations. La croissance après taille quand elle est relativement similaire pour les arbres taillés représentant en moyenne 14,72% par rapport au temps t_t . Après taille, les arbres présentent une croissance significativement supérieure à celle des arbres témoins dont l'augmentation du volume exploré par la couronne correspond en moyenne à 5,54% du volume exploré au temps t_0 (ANOVA, $p = 0,0004$). Les distances des voxels issus des soustractions par rapport au centre de la couronne ont ensuite été étudiés afin de situer les zones de taille et de croissance pour chaque type d'arbre (Figure 2.4). Pour les arbres taillés, les distributions de la distance des voxels par rapport au centre de la couronne présentent un coefficient de symétrie de 0,274 et un coefficient de kurtose de 0,18 illustrant une légère asymétrie vers les petites valeurs de distance et une relative homogénéité. Les branches supprimées lors de la taille se situent donc principalement dans la partie centrale à médiane de la couronne. Au contraire, les zones de recroissance, que ce soit pour les arbres taillés ou témoins, présentent des coefficients de symétrie négatifs (-0,456 pour t_e et -0,534 pour t_a) démontrant une assymétrie des distributions vers les grandes valeurs de distance. Il semblerait donc que pour les arbres taillés et témoins, l'essentiel de la croissance se fasse en périphérie de la couronne. Cependant, des paramètres de kurtose proches de 0 (0,013 pour t_e et 0,069 pour t_a) symptomatiques de distributions relativement homogènes laissent à penser que toute la croissance ne se fait pas en périphérie de la couronne. Ce phénomène peut avoir plusieurs origines telle

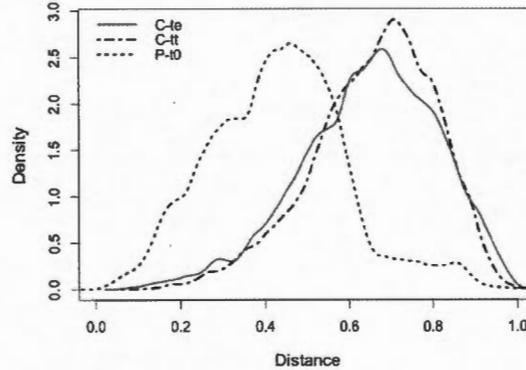


Figure 2.4 Graphiques de densité de la distance au centre de la couronne de la croissance des arbres témoins (C-te), de la croissance suivant la taille des arbres taillés (C-tt) et des pertes induites par la taille (P-t0).

que, par exemple, une disparité de la distance de la périphérie de la couronne par rapport au centre ou la mise en place de rameaux épïcormiques sur les branches maîtresses pour les arbres témoins ou de réitérations traumatiques de petit volume pour les arbres taillés.

2.3.3 Implications sur le volume d'espace exploré par la couronne

Le volume d'espace exploré par chaque arbre a été calculé. Afin de normaliser le volume exploré par les arbres dans un but de comparaison, le rapport volume / DHP a été calculé. En début de cycle, les arbres taillés et témoins ne présentent pas de différences significatives en terme de volume exploré par la couronne (ANOVA t0 vs. te, $p = 0,8774$, Figure 2.5). Les interventions de taille provoquent une diminution significative du volume exploré par les arbres qui y sont soumis (ANOVA te vs. tt, $p = 0.0165$ et t0 vs. tt = $p = 0.0452$). En revanche, l'année suivant la taille, les arbres taillés semblent compenser les pertes induites par les interventions d'émondage (ANOVA t0 vs. tt+1, $p = 0.4868$ et te+1 vs. tt+1, $p = 0.8496$).

Tableau 2.2 Pertes et croissance des arbres taillés et témoins

ID	type	pertes	recroissance
1	ta	7,76	11,8
2	ta	8,07	12,7
3	ta	8,21	16,98
4	ta	27,12	17,42
		12,79	
	ta	$\pm 9,55$	14,72 $\pm 2,89$
		8,01*	
		$\pm 0,23^*$	
5	te	-	4,57
6	te	-	6,79
7	te	-	4,91
8	te	-	4,19
9	te	-	7,25
	te		5,54 $\pm 1,38$

* Après suppression de l'ID 4

Il semblerait donc qu'une croissance accrue, l'année suivant la taille, permette aux arbres qui y sont soumis de recoloniser un volume d'espace quantitativement similaire à celui qu'ils occupaient avant la taille.

2.4 Discussion

Une approche originale basée sur l'analyse de données T-LiDAR nous a permis d'étudier avec précision les implications de la taille de dégagement des réseaux électriques, dite unidirectionnelle en « V », sur l'ensemble de la couronne d'Érables argentés. Nous avons d'abord observé plusieurs modifications morphologiques de la couronne pouvant être à l'origine de cette réponse des arbres taillés aux émondages. Nos résultats montrent d'abord une distribution bilatérale du matériel dans la couronne des arbres taillés, menant à deux zones latérales concentrant une grande proportion de matériel de part et d'autre des fils. Cette couronne bilatérale, causée par l'effet mécanique de la taille, interdit aux arbres taillés d'explorer l'espace au sud de leur couronne (en suivant l'axe des réseaux) ce qui semble être le mode de développement préférentiel des arbres non taillés. Cette modification importante de la morphologie de la couronne implique également des modifications plus fines au sein de chacune des zones latérales. Il semblerait d'abord que

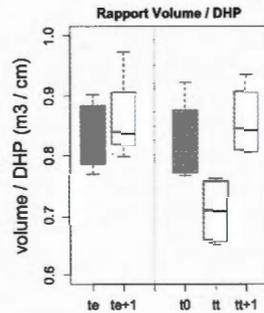


Figure 2.5 Boxplot du rapport Volume / DHP pour les cinq catégories d'arbres, de gauche à droite : témoins (te), témoins après une année de croissance (te+1), taillés avant taille (t0), taillés après taille (tt) et taillés après une année de croissance (tt+1).

les arbres taillés présentent une homogénéisation de la distribution du matériel du centre vers la périphérie de leur couronne ainsi qu'une légère augmentation de la saturation de l'espace. Ces résultats pourraient être, hypothétiquement, influencés par la modification de l'orientation des branches maîtresses de part et d'autre des fils. Ces dernières étant très ramifiées latéralement vers l'extérieur de la couronne et présentant un grand nombre de fourches traumatiques, pouvant apparaître après une taille (Drénou, 2000), et la mise en place d'une grande quantité de branches de faibles volumes. En terme de volume d'espace total exploré par la couronne, nos résultats montrent que les arbres taillés présentent en début de cycle, soit immédiatement après une intervention d'émondage, un volume significativement inférieur à celui des arbres témoins (différence significative entre les arbres tt et te). Les interventions d'émondage entraînant une diminution de 12,79% ($\pm 9,55$), en moyenne, 8,07 ($\pm 0,23$) après suppression d'un arbre non comparable aux autres, du volume total d'espace exploré par la couronne. Au cours de la première année suivant la taille, les arbres taillés présentent une croissance significativement supérieure à celle des arbres témoins (14,72% $\pm 2,89$ contre 5,54% $\pm 1,38$ respectivement) leur permettant de compenser ces pertes en seulement une saison de croissance. Les interventions d'émondage entraînent donc une baisse épisodique du volume exploré

par la couronne, rapidement compensée par une croissance importante des arbres taillés. Ces interventions d'émondage ne semblent donc pas entraîner de réduction de l'accroissement de la couronne, ce qui, comme discuté par Pinkard (et al. 1998b), peut être le cas lors de très lourdes interventions (suppression de 70% de la cime vivante) mais au contraire la stimuler. Il est cependant probable que cette compensation ne soit que partielle en terme de biomasse. Rasmussen et Nørgaard (2005) ayant démontrés que suite à une intervention de taille, les arbres parviennent à compenser les pertes en terme de nombre de branches, ce qui semble se rapprocher de l'indicateur utilisé dans cette étude (volume d'espace exploré), mais pas en terme de biomasse. Il est possible que la croissance accrue des arbres taillés permette de supporter un volume foliaire similaire à celui des arbres témoins. Cependant, l'efficacité photosynthétique des couronnes bilatérales peut être affectée par des phénomènes d'auto-ombrage (Delagrange et al. 2006) induits par la densification des zones non taillées, une modification de la forme des feuilles ou de leur efficacité propre (Pinkard et Beadle, 1998 ; Pinkard et al., 1998b). Enfin, la recroissance observée dans cette étude se fait principalement par une dynamisation de la croissance en périphérie de la couronne. Bien que des réitérations traumatiques de petites tailles soient apparues, ce résultat va à l'encontre de ceux présentés par Goodfellow et al. (1987), qui ont relevé une très forte recroissance dans le centre de la couronne la première année suivant la taille sous la forme de rejets. Ce résultat est de première importance puisque la problématique soulevée dans cette étude née essentiellement de la croissance de ces réitérations traumatiques entrant rapidement en conflit avec les réseaux de distribution électrique. Il est probable que la saison de taille hivernale soit la cause de ce retard. Réaliser, dans la mesure du possible, les interventions de dégagement des réseaux électriques en hiver pourrait permettre aux distributeurs d'électricité de réaliser des économies budgétaires en allongeant la durée des cycles de taille d'une année.

La littérature sur les tailles de dégagement des réseaux électriques ne présente pas de vision globale de l'arbre mais traite de problématiques particulières : croissance des réitérations traumatiques (Goodfellow et al. 1987), compartimentation des cicatrices de taille (Dujesiefken et Stobbe, 2004, Grabosky et Gilman, 2007, etc.), forme

globale de la couronne en relation avec l'architecture (Millet et Bouchard 2003). Cependant, nous pensons qu'il est nécessaire de poser les bases théoriques de l'analyse du système arbres / tailles unidirectionnelles en V. En se basant sur les résultats présentés dans cette étude, nous proposons la formulation, sur la base d'hypothèses et de faits observés, d'une approche globale de la problématique des tailles de dégagement des réseaux électriques. Il est probable que, suite à une taille hivernale, la croissance dynamique (Goodfellow et al. 1987) des réitérations traumatiques soit décalée à la seconde année après la taille. Ces réitérations pourraient entraîner une modification importante de l'allocation de biomasse, en drainant une part non négligeable des ressources et ainsi entraîner une diminution de la croissance en périphérie de la couronne. En accord avec les théories du « pipe model » (Perttunen et al. 1996) et du « vigor index » (Goulet et al. 2000, Nikinmaa et al. 2003) ces réitérations traumatiques, généralement situées sur des branches de gros diamètre, pourraient bénéficier d'une part importante du flux de sève. Ces réitérations joueraient alors un rôle de maintien du volume exploré par la couronne et non un rôle de réaction la première année suivant la taille. Cependant le fait que cette recroissance, dans le cadre de cette étude, se fasse principalement en périphérie de la couronne peut être due aux tailles hivernales ce qui rend cette observation difficilement généralisable. La figure 2.6 récapitule cette proposition sous la forme d'un modèle théorique de croissance au sein d'un cycle de taille.

Ce modèle propose plusieurs variations puisqu'il est soumis à des inconnus. En terme de volume total exploré par la couronne, l'évolution des arbres témoins est présentée sous la forme d'un accroissement linéaire afin de faciliter la lecture. Deux scénarios sont alors proposés pour les arbres taillés : le scénario 1 admet une croissance linéaire pour chaque phase de croissance (une phase de croissance accélérée la première année et un retour à la normale les années suivantes) ; le scénario 2 propose un décroissement progressif de l'augmentation du volume exploré par la couronne. Dans les deux cas, les arbres taillés présentent un rapport volume exploré par la couronne / DHP équivalent à celui des arbres témoins en fin de cycle. En ce qui concerne la croissance, en accord avec nos résultats, elle est présentée comme étant très dynamique en périphérie

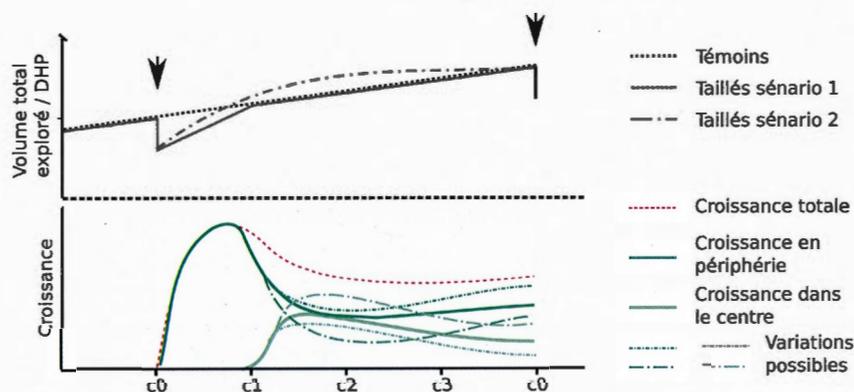


Figure 2.6 Graphiques de synthèse du modèle de croissance théorique prenant part à un cycle de taille. La légende est indiquée dans le graphique.

de la couronne la première année suivant la taille. S'ensuit une réduction progressive de cette croissance périphérique les années suivant la taille au profit de réitérations traumatiques apparaissant dans le centre de la couronne. Comme la croissance est exprimée dans cette étude en terme de ré-exploration de l'espace, plusieurs variations de celle-ci sont proposées, la traduction des taux de croissance en terme d'exploration de l'espace étant soumise à des incertitudes.

Enfin, je pense qu'il est nécessaire de proposer une vision globale du système arbres / tailles unidirectionnelles en V permettant d'expliquer les modifications morphologiques observées. Le système proposé, basé sur les observations de cette étude et des composantes théoriques issues de la littérature, devrait permettre de cibler des points importants du fonctionnement des arbres susceptibles d'entraîner ces modifications. Nous proposons un système basé sur la synergie de plusieurs phénomènes : un effet direct de la taille, une modification de la physiologie de la couronne et les caractéristiques architecturales de l'espèce. La suppression de rejets vigoureux peut entraîner un afflux important de sève, accroissant ainsi le potentiel de croissance dans les parties non taillées de la couronne. Les Érables argentés, bien que possédant une croissance monopodiale lors de leur stade de développement juvénile, transitent, dans des stades plus avancés, vers une

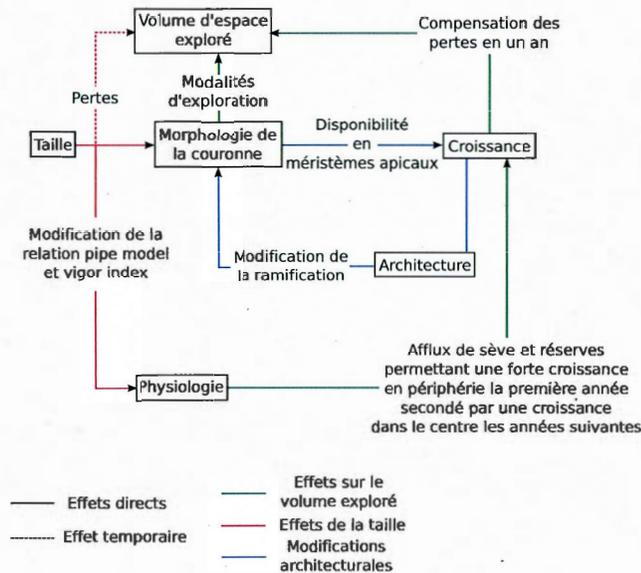


Figure 2.7 Schéma de synthèse du système arbres / tailles unidirectionnelles en V. La légende est indiquée dans le graphique.

croissance sympodiale (Millet et Bouchard, 2003). J'émetts l'hypothèse qu'une augmentation de la croissance, couplée à une croissance sympodiale, puisse entraîner la mise en place de fourches, une forte ramification dans les parties latérales de la couronne ou un allongement plus important des branches latérales modifiant ainsi les modalités d'exploration de l'espace. Cette hypothèse sous-entend que la réponse apportée aux tailles de dégagement des réseaux électriques est fortement liée aux modalités de croissance de l'espèce concernée. Ainsi, il paraît nécessaire, dans le cadre d'évolution des pratiques de taille, d'étudier séparément chacune des espèces problématiques afin de proposer des solutions spécifiques. Le système proposé est synthétisé dans la figure 2.7.

Je pense qu'une approche par modélisation peut être une voie privilégiée afin de vérifier ces hypothèses. En effet, une potentielle augmentation de la ramification, la suppression et la croissance de réitérations traumatiques ainsi qu'une modification de la conduction de la sève peuvent affecter la relation sources-puits d'allocation du carbone dans l'arbre.

Cette étude a permis de poser les bases théoriques de l'étude des arbres subissant des tailles de dégagement des réseaux électriques. Je pense que des études plus approfondies, menées dans différents contextes de taille et dépendant notamment de la période durant laquelle elle est réalisée, permettront d'établir un diagnostic plus précis et de définir concrètement les relations internes aux modèles proposés. Ces futures études devraient également s'intéresser à l'influence des tailles en terme de volume foliaire et d'efficacité photosynthétique, la compartimentation des cicatrices de taille ou la solidité mécanique de la structure. Ces deux facteurs sont à prendre en compte car ils peuvent interagir sur la croissance et l'allocation des ressources ou modifier de façon importante les modalités d'exploration de l'espace par la couronne des arbres. Enfin, je tiens à affirmer ma conviction que les contraintes techniques doivent être prises en compte dans le cadre d'études futures. Ces dernières pouvant influencer une variabilité importante dans les pratiques de taille et notamment sur la quantité de matériel supprimé qui est soumise à la subjectivité et à l'interprétation des émondeurs.

Je suis conscient que le faible échantillonnage de cette étude rend les résultats difficilement généralisables, d'autant plus que la zone d'étude est restreinte. Cependant, je pense qu'il était nécessaire de réaliser une première approche globale de cette problématique. Enfin, j'espère de partager la méthode d'analyse des scènes LiDAR utilisée dans cette étude, sous la forme d'un package R afin de faciliter les études à plus large échelle.

CONCLUSION

Cette étude a permis le développement d'une méthode d'analyse des données issues d'un capteur T-LiDAR permettant d'étudier les modalités d'exploration de l'espace par la couronne des arbres. Ce nouvel indicateur ouvre les portes d'un domaine encore vierge offrant ainsi de nouvelles perspectives dans l'étude des arbres de grandes dimensions. Cette méthode en constitue donc une première approche et les outils algorithmiques originaux d'analyse des données LiDAR, présentés dans ce document sous la forme d'un package R, ont été développés dans ce but. Le package « VoxR » offre donc la possibilité d'une analyse fine de la structure complexe des arbres basée sur des descripteurs inédits.

Les algorithmes offerts par ce package permettent :

- La voxelisation du nuage de point LiDAR original
- Le calcul du volume des arbres relativisé par leur DHP
- La projection des nuages de voxels dans un plan permettant l'analyse de la saturation de l'espace par la couronne des arbres
- L'analyse de la dispersion des voxels par des mesures de distance par rapport à un point défini par l'utilisateur ou un axe du repère orthonormé de référence
- L'analyse de la dispersion des voxels par des mesures d'angle des voxels par rapport à un axe du repère arthonormé de référence
- La soustraction de deux scènes LiDAR d'un même objet permettant par exemple la comparaison d'un même objet numérisé à deux temps différents
- La reconnaissance d'objets spatialement différenciés présents dans les soustractions décrites ci-dessus

Nous proposons également une discussion sur l'utilisation des voxels et le choix d'une résolution. Cette dernière étant essentiellement rattachée à l'expérience de l'utilisateur et aux hypothèses posées. Le package « VoxR » devraient être rendu disponible prochainement en « open sources ». Nous pensons en effet que cette approche puisse être

pertinente pour plusieurs domaines de l'étude des arbres (ou plus largement pour les études reposant sur l'analyse de données LiDAR).

Nous avons ensuite appliqué cette méthode à une étude des implications des tailles de dégagement des réseaux électriques sur l'exploration de l'espace par la couronne d'arbres taillés en comparaison avec des arbres témoins. Nous avons ainsi étudié quantitativement l'exploration de l'espace par les arbres. Pour cela, nous avons utilisé le rapport Volume / DHP qui permet d'extraire la quantité normalisée d'espace exploré par la couronne de chaque arbre. Nous avons également étudié la localisation du matériel au sein de la couronne à l'aide de découpages polynomiaux réalisés sur des distributions de voxels par rapport à l'axe des X du repère orthonormé original (largeur de l'arbre). La dispersion des voxels a été étudiée à l'aide de calculs d'angles (par rapport à l'axe des Y) et de distances (par rapport à un point central de la couronne et à l'axe des Z). Enfin, la méthode VoxR nous a permis de mener des analyses sur la saturation de l'espace dans les couronnes d'arbres taillés et d'arbres témoins. Nos résultats suggèrent plusieurs modifications de la morphologie de la couronne des arbres taillés en comparaison aux arbres témoins :

- Constitution d'une couronne bilatérale, entraînant la concentration du matériel de part et d'autre des réseaux électriques
- Extériorisation du matériel vers la périphérie de la couronne
- Légère augmentation de la saturation de l'espace au sein de la couronne De plus, les modifications dans le volume d'espace total exploré par la couronne, nous permettent d'émettre les observations suivantes :
- Avant intervention de taille, les arbres taillés présentent un total de volume exploré par leur couronne équivalent à celui des arbres témoins
- La taille provoque une diminution du volume exploré par la couronne de 12,79% (8,01% après la suppression d'un individu non comparable aux autres) en moyenne.
- Après une année de croissance les arbres taillés réussissent à compenser ces pertes et à revenir au niveau des arbres témoins après une année de croissance ceci étant rendu possible par une croissance plus importante des arbres taillés (14,72% du

volume de l'arbre après taille) que celle des arbres témoins (5,54% du volume des arbres avant croissance).

- La croissance des arbres taillés mise en place après une intervention de taille se fait principalement en périphérie de la couronne et en la quasi-absence de réitérations traumatiques.

En nous basant sur ces observations, nous avons posé les bases d'une étude globale de l'interaction arbres / réseaux électriques. Nous proposons ainsi, d'une part, un modèle théorique de croissance visant à caractériser les phénomènes de croissance possibles intervenant au sein d'un cycle de taille et, d'autre part, un système théorique régissant les modifications observées à long terme.

En somme, cette étude a permis, grâce au développement d'une méthode originale d'analyse de scènes LiDAR, de mettre en évidence les effets des tailles de dégagement des réseaux électriques sur les arbres. Elle permet, en outre, d'aborder dans un cadre théorique la compréhension globale de cette problématique sans laquelle la recherche de solutions semble hasardeuse.

APPENDICE A

GLOSSAIRE DES TERMES D'ARCHITECTURE DES ARBRES

Acrotonie : un axe acrotone est caractérisé par une croissance plus importante des axes latéraux présents sur sa partie distale (en opposition à la *basitonie* et à la *mésotonie*).

Âge physiologique : niveau de différenciation d'un bourgeon à un temps donné. Les structures mises en place par ce dernier sont d'un âge physiologique équivalent. *Apex* : bourgeon terminal d'un axe ; il est constitué d'un méristème primaire apical (cf. *méristèmes*), d'organes à l'état embryonnaire et de pièces de protection.

Axe feuillé : axe destiné à la photosynthèse résultant de la superposition de *Phytomère*.

Basitonie : un axe basitone est caractérisé par la croissance plus importante des axes latéraux présents sur sa partie basale (en opposition à l'*acrotonie* et à la *mésotonie*).

Bourgeon axillaire : bourgeon latéral d'un axe mis en place par l'*apex*.

Croissance continue : croissance qui, bien qu'elle puisse présenter des variations d'intensité, ne présente pas de pause au cours de l'année (en opposition à la *croissance rythmique*). Elle est rencontrée uniquement dans les régions tropicales ou en conditions expérimentales.

Croissance déterminée : croissance qui résulte du fonctionnement défini de l'*apex* (cf. *potentiel d'élongation*).

Croissance indéterminée : croissance qui résulte du fonctionnement indéfini d'un *apex*

unique (cf. *potentiel d'élongation*).

Croissance monopodiale : croissance qu'on observe lorsqu'un *apex* présente un *potentiel d'élongation* indéfini et qu'il poursuit tout au long de sa vie la construction de l'axe (en opposition à la *croissance sympodiale*).

Croissance rythmique : croissance caractérisée par une, ou plusieurs, pauses de la croissance au cours de l'année (en opposition à la *croissance continue*). Elle peut résulter de facteurs internes (transformation, avortement ou entrée en dormance de l'*Apex*) ou des conditions de l'environnement (températures, sécheresse). À noter que, dans les régions tempérées, la croissance est uniquement rythmique en raison du froid hivernal.

Croissance sympodiale : lorsque la croissance d'un axe est rythmique, il peut arriver que l'*apex* disparaisse ou entre dans une phase indéterminée de dormance. Il est alors relayé par un bourgeon axillaire qui poursuivra l'édification de l'axe. Un axe est alors un empilement d'unités de croissance mises en place par des bourgeons différents.

Effet de base : traduit l'évolution et les modifications dimensionnelles, fonctionnelles et morphologiques des unités réitérées. Il est notamment dû à la succession des mécanismes morphogénétiques et à la différenciation des méristèmes apicaux.

Méristèmes : zones de division cellulaires actives. Deux types sont à différencier : les méristèmes primaires, présents dans les bourgeons, qui permettent la croissance et la longueur (des axes aériens et souterrains) et les méristèmes secondaires, présents en périphérie des axes, qui permettent la croissance radiale.

Mésotonie : un axe mésotone est caractérisé par la croissance plus importante des axes latéraux présents sur sa partie médiane (en opposition à la *basitonie* et à l'*acrotonie*).

Modèles architecturaux : ce sont des stratégies de croissance programmées génétiquement. Il en existe 23 regroupant l'ensemble du règne végétal. Chaque espèce présente une interprétation propre d'un modèle architectural ; c'est l'*unité architecturale*.

Néoformation : des organes qui ne sont pas présents à l'état embryonnaire dans l'*apex*

sont mis en place, ils sont qualifiés de néoformés ou dans certains cas de surnuméraires (en opposition à la *préformation*).

Niveau de différenciation : décrit la spécialisation d'un bourgeon ou d'un axe mis en place par ce dernier.

Organogenèse : processus de formation et d'agencement (cf. *Phyllotaxie*) des différents organes de l'arbre. Elle est la résultante de l'activité de l'*apex*.

Phyllotaxie : schéma d'organisation rythmique et répétitif définissant les modalités d'agencement des organes. Elle est réalisée par l'*apex*.

Phytomère : unité structurelle élémentaire constituée de l'ensemble entre nud nud bourgeon axillaire feuille.

Potentiel d'élongation : capacité d'un bourgeon terminal à conserver ou non sa capacité à poursuivre la morphogenèse. Il peut être indéfini, c'est à dire que, sauf accident, l'*apex* poursuit la morphogenèse jusqu'à la mort de la branche, ou il peut être défini, c'est-à-dire que l'*apex* meurt ou se transforme en un organe (la plupart du temps sexuel) après une période donnée de croissance. On parle alors de *croissance déterminée* ou *indéterminée*.

Préformation : certains organes destinés à mettre en place par l'*apex* sont présents à l'intérieur de celui-ci sous forme embryonnaire (en opposition à la *néoformation*). Il peut s'agir de feuilles, bourgeons, etc.

Ramification immédiate : caractérise le développement immédiat d'un bourgeon axillaire après son initiation par l'*apex* (en opposition à la *ramification retardée*).

Ramification retardée : elle est caractérisée par un laps de temps plus ou moins long entre l'initiation d'un bourgeon axillaire et le début de sa croissance (en opposition à la *ramification immédiate*).

Ramification continue : elle est observée lorsque tous les méristèmes axillaires d'un axe se développent.

Ramification diffuse : elle apparaît lorsque tous les bourgeons axillaires ne se développent pas et qu'aucune régularité n'est observée dans l'entrée ou non en croissance (en opposition à la *ramification rythmique* et à la *ramification continue*).

Ramification rythmique : un axe présente une ramification rythmique lorsque tous ses bourgeons axillaires ne se développent pas mais qu'une régularité dans l'entrée ou non en croissance est observée.

Réitération : c'est un mécanisme d'édification de la forme des arbres. Elle consiste en la répétition d'un modèle de base (l'*unité architecturale*) et résulte de la levée de dormance de *méristèmes axillaires*. Elle peut être un mécanisme de colonisation de l'espace génétiquement contrôlé et donc prévisible (*réitération séquentielle*), permettant l'adaptation à des changements dans l'environnement lumineux (*réitération adaptative*) ou permettant le maintien du volume de la couronne lors d'un traumatisme ou d'un dépérissement de celle-ci (*réitération traumatique*).

Réitération adaptative : mécanisme de *réitération* ayant pour objectif d'adapter la forme de l'arbre aux modifications de son environnement lumineux (par exemple des trouées en milieu forestier) et colonisant l'espace disponible.

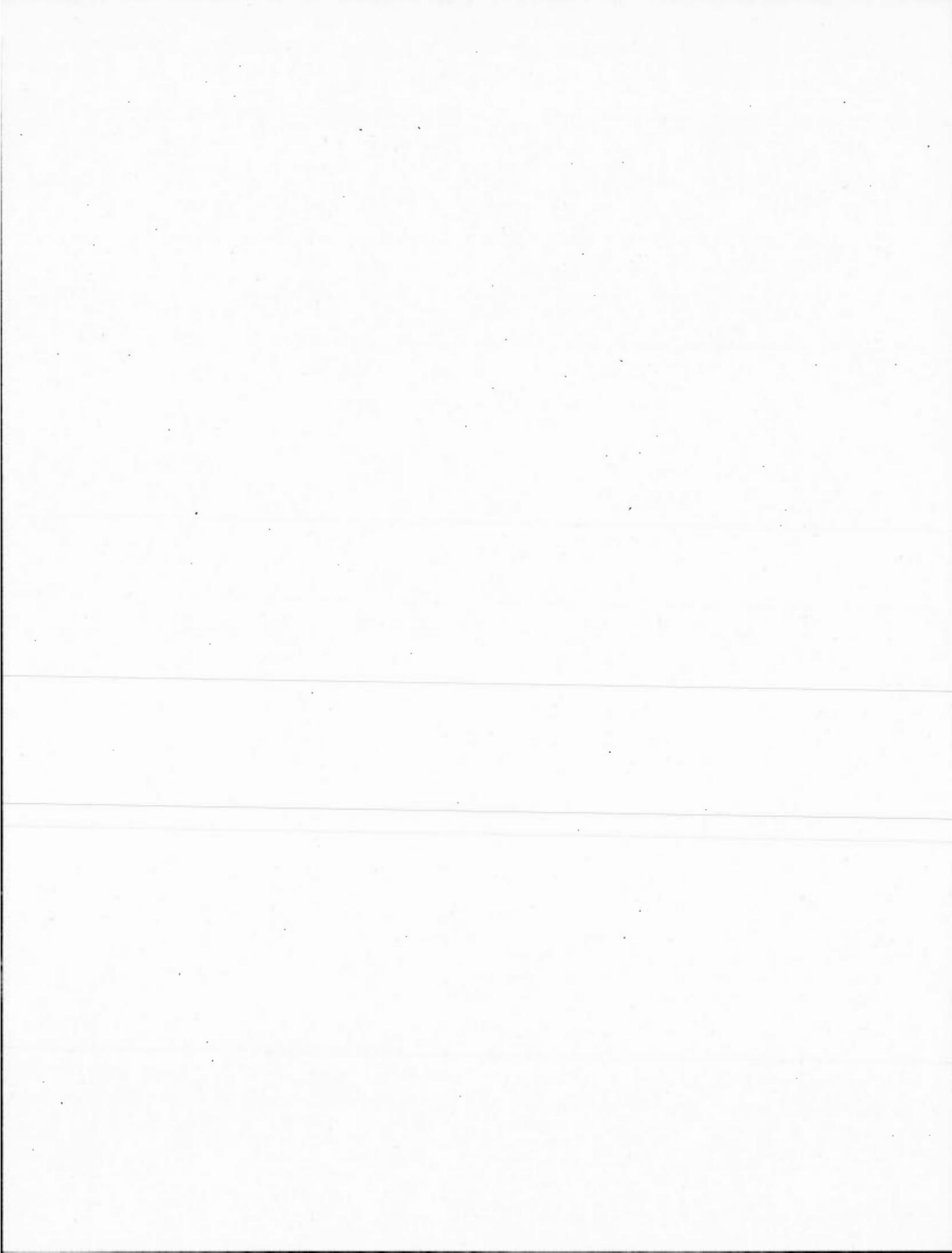
Réitération séquentielle : mécanisme de *réitération* génétiquement établi permettant l'édification de l'architecture des arbres colonnaires. Elle consiste en la multiplication de l'*unité architecturale* par un empilement organisé d'unités réitérées.

Réitération traumatique : mécanisme de *réitération* permettant aux arbres de conserver le volume de leur couronne suite à un traumatisme ou un dépérissement de celle-ci. Elle consiste en la mise en place de nouveaux axes résultants de la levée de dormance de *bourgeons axillaires*.

Unitaire (arbre) : un arbre unitaire se développe en restant, tout au long de sa vie, conforme à son *unité architecturale* et, en dehors de traumatismes, se contente de l'agrandir.

Unité architecturale : basée sur la notion de *modèle architectural*, elle constitue le premier niveau d'organisation de la vie d'un arbre. C'est l'unité fondamentale d'un point de vue architectural, physiologique et fonctionnel de l'espèce concernée.

Unité de croissance : ensemble du matériel végétal mis en place durant une période de croissance, comprise entre deux pauses de l'*apex* (dans le cadre de la *croissance rythmique*). Des marques permettent généralement d'identifier à posteriori les unités de croissance (cicatrices laissées par l'*apex*, changement de diamètre de la moelle).



APPENDICE B

MANUEL D'UTILISATION DES FONCTIONS DE LA LIBRAIRIE VOXR

B.1 vox (data, res, plot3D)

La fonction vox permet une voxelisation standard des scènes LiDAR. Elle permet de transformer un nuage de points en nuage de voxels.

- Principe : vox consiste en l'arrondissement des coordonnées de chaque point du nuage original à une résolution res. Il en résulte un nuage de voxels référencé dans le même repère orthonormé que le nuage de points original.
- Paramètres :
 - data : data frame contenant les coordonnées x, y, z de chaque point
 - res : résolution de la voxelisation (longueur de l'arête d'un voxel) donnée dans l'unité du repère original
 - plot3D : option de visualisation du nuage de voxels (test logique : TRUE ou FALSE)
- Output : data frame contenant les coordonnées de chaque voxel et le nombre de points qu'il contient
- Réglages par défaut :
 - res = 1
 - plot3D = FALSE

B.2 point.distance.dispersion (data, point)

Permet de calculer la distance entre chaque voxel et un point constant du repère.

- Principe : retourne pour chaque voxel une distance par rapport à un point du repère défini par l'utilisateur.
- Paramètres :
 - data : data frame x, y, z, autre
 - point : objet de type vecteur contenant les coordonnées du point de référence (point = $c(x, y, z)$)
- Output : un vecteur contenant les distances calculées
- Réglages par défaut :
 - point = $c(0,0,0)$

B.3 axis.distance.dispersion (data, axis)

Permet de calculer la distance entre chaque voxel et un axe du repère arthonormé.

- Principe : retourne pour chaque voxel une distance par rapport à un axe du repère défini par l'utilisateur.
- Paramètres :
 - data : data frame x, y, z, autre
 - axe à partir duquel la distance est calculée ("X", "Y" ou "Z")
- Output : un vecteur contenant les distances calculées
- Réglages par défaut :
 - axis = "X"

B.4 axis.angle.dispersion (data, axis, projected)

Permet de calculer l'angle formé par chaque voxel avec un axe du repère par rapport à l'origine.

- Principe : pour chaque voxel, retourne l'angle par rapport à un axe du repère défini par l'utilisateur et l'origine.
- Paramètres :
 - data : data frame x, y, z, autre
 - data : data frame x, y, z, autre

- projected : projette les voxels dans un plan dont un des deux axes est celui à partir duquel l'angle est calculé (si axis = « X », projected = « xz » ou « xy » ; si axis = « Y », projected = « xy » ou « xz » ; si axis = « Z », projected = « xz » ou « yz »)
- Output : un vecteur contenant les angles calculés.
- Réglages par défaut :
 - projected = FALSE

B.5 project (data, dim)

La fonction project permet la projection du nuage de voxels dans un plan formé par deux axes du repère orthonormé.

- Principe : projeter chaque voxel dans une grille de pixels référencée par deux axes du repère orthonormé original. Les voxels ayant les mêmes coordonnées sur les axes de projection sont projetés dans le pixel correspondant.
- Paramètres :
 - data : data frame contenant les coordonnées x, y, z de chaque voxel
 - dim : dimension de projection, soit « xy », « xz » ou « yz ».
- Output : data frame contenant les coordonnées de chaque pixel, le nombre de voxels et le nombre de points qu'il contient et le ratio npts/nvox (nombre de points par sa dispersion).
- Réglages par défaut :
 - dim = « xy »

B.6 levels (datas, method, levels)

La fonction levels permet de définir des niveaux de densité (relatifs au nombre de points ou au nombre de voxels) contenus dans les pixels de la table d'output de la fonction project. Chaque niveau de densité sera ensuite utilisé afin de définir des classes de densité utiles dans d'autres fonctions.

- Principe : permet de créer des niveaux de densité à partir d'un vecteur contenant les

valeurs d'une même variable pour plusieurs objets.

– Paramètres :

– `datas` : objet de type vecteur contenant l'information d'une même variable pour plusieurs objets (exemple pour le nombre de points `npts` : `datas = c(npts.obj1,npts,obj2 npts.objn)`)

– `by` : permet de définir la méthode de calcul des niveaux de densité. Par « `quantiles` » ou par pourcentages définis par l'utilisateur « `percent` ».

– `levels` : si la méthode choisie est « `quantile` », `levels` indique les quantiles à définir (par exemple : `levels = 0.25` calcul les quantiles, `levels = 0.20` calcul les quintiles, `levels = 0.01` calcul les percentiles). Si la méthode choisie est « `percents` » l'utilisateur est alors libre de définir lui-même les niveaux désirés sous la forme d'un objet de type vecteur (exemple : `levels = c(10, 40,70,99)`, les niveaux seront respectivement de 10%, 40%, 70% et 99%).

– `Output` : objet de type vecteur contenant la valeur de chaque niveau.

– Réglages par défaut :

– `by` = « `quantiles` »

– `levels` : si `by` = « `quantiles` », `levels = 0.25`; si `by` = « `percents` », `levels = c(25, 50, 75)`

B.7 `surface` (`data`, `levels`, `method`, `res`, `porportion`)

La fonction `surface` permet de calculer la surface occupée par chaque classe de densité.

Chacune des classes de densité étant définie de la façon suivante : `levelj=surfacej/level+1`.

– Principe : permet de calculer la surface occupée par chaque classe de densité relative à son nombre de pixels d'une résolution `r` connue.

– Paramètres :

– `data` : table produite par la fonction `project`

– `levels` : objet de type vecteur contenant les valeurs de niveaux de densité qui définiront les classes (peuvent être calculées par la fonction `levels`)

– `method` : « `nvox` », « `npts` » ou `ratio` selon si la variable à prendre en compte est

- la densité de voxels, la densité de points ou le ratio npts/nvox
- res : résolution des pixels (longueur d'une arête). À noter que si res = 1, la surface correspond au nombre de pixels.
- proportion : option permettant de donner la surface de chaque classe de densité en proportion de la surface totale (test logique : TRUE ou FALSE)
- Output : objet de type vecteur donnant la surface de chaque classe
- Réglages par défaut :
 - levels : quantiles 0.25
 - method = « nvox »
 - res = 1
 - proportion = FALSE

B.8 raster.projection (data, res, method, levels, title, colors, contour, classlegend, surf, dim)

Raster.projection permet de créer une image raster des projections créées par la fonction project.

- Principe : créer une image raster respectant les coordonnées de chaque pixel et représentant chaque classe de densité par une couleur définie par l'utilisateur.
- Paramètres :
 - data : nuage de voxels projeté
 - res : résolution des pixels
 - method : variable à prendre en compte et à attribuer à chaque pixel (« nvox », « npts » ou « ratio »)
 - levels : niveaux de densité faisant passer à une classe de densité différente (tel que calculés par la fonction levels)
 - title : titre du raster (exemple : title = « title »)
 - colors : objet de type vecteur contenant les couleurs à utiliser pour chaque classe de densité. Si le nombre de couleurs est différent de celui des classes de densité, les couleurs peuvent être utilisées plusieurs fois.

- contour : option permettant de tracer ou non le contour des classes de densité (test logique : TRUE ou FALSE)
- classlegend : nom à attribuer à chacune des classes (vecteur)
- surf : objet de type vecteur présentant la surface de chacune des classes (tel que calculé par la fonction surface)
- dim : dimension de projection similaire à celle utilisée dans la fonction project
- Output : image raster de l'objet projeté dans la fenêtre graphique par défaut de R.
- Réglages par défaut :
 - method = « nvox »
 - res = 1
 - levels = quantiles 0.25
 - title = « »
 - colors = c(gris, vert, jaune, rouge)
 - contour = TRUE
 - classlegend = « »
 - surf = « »
 - dim = « xy »

B.9 substract.objects (data1, data2, res, nvox.reaserch)

Permet de soustraire deux nuages de voxels en détectant les voxels communs.

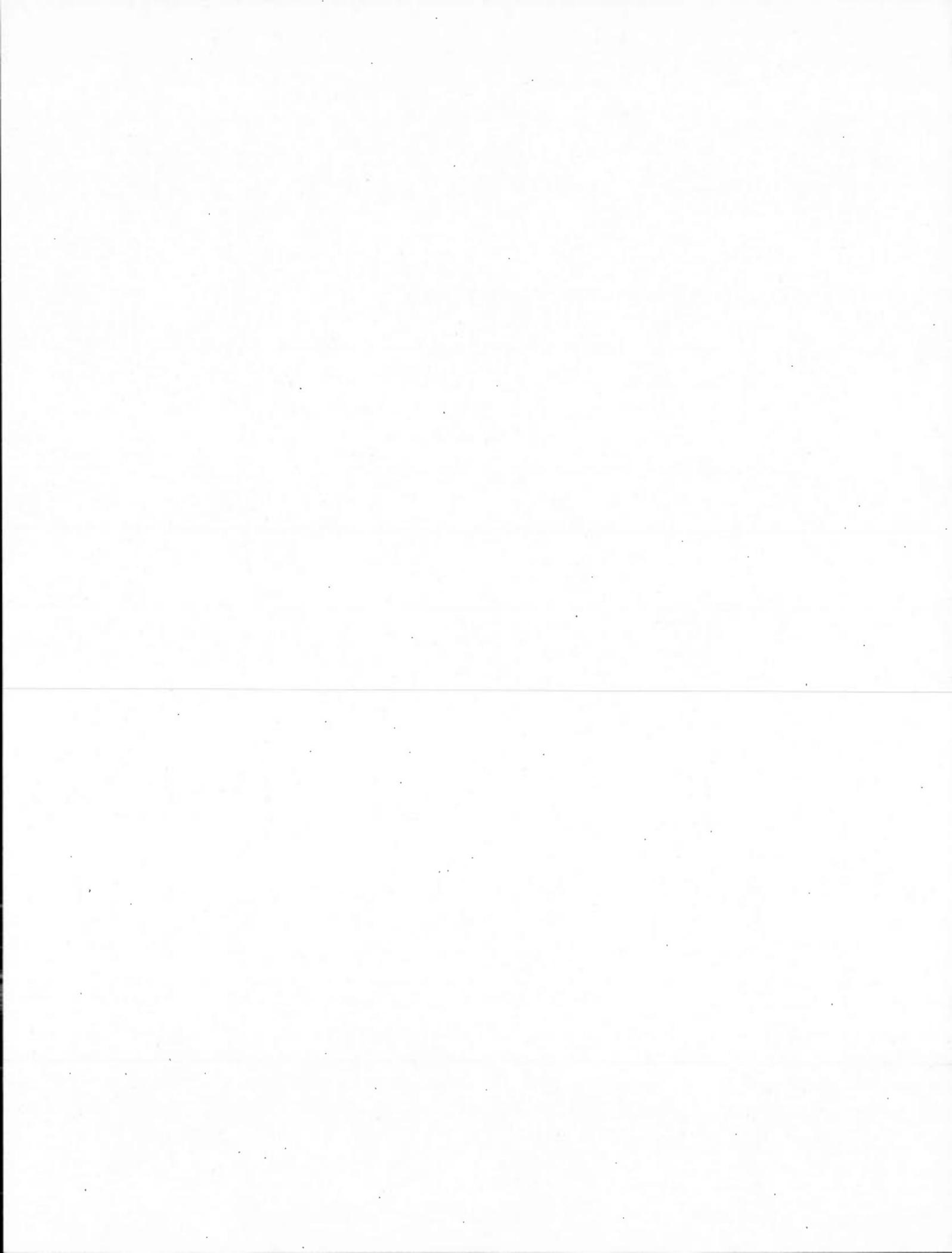
- Principe : détecter les voxels d'une scène LiDARisolés dans un voxel de taille supérieure ou égale à la sienne de tout autre voxels d'une autre scène. Ceci permet de se défaire, au moins en partie, des défauts d'alignement ou de ceux liés à l'occlusion.
- Paramètres :
 - data1 : nuage de voxels x, y, z au temps 1 (objet de référence)
 - data2 : nuage de voxels x, y, z au temps 2 (objet à soustraire)
 - res : résolution d'un voxel
 - nvox.reaserch : facteur de la résolution donnant la distance de recherche du voisinage d'un voxel

- Output : nuage de voxels x, y, z uniques à data1
- Pas de paramètres par défaut

B.10 objets.reconuition (data,dist.research)

Permet de reconnaître individuellement des objets spatialement différenciés au sein d'un nuage de points.

- Principe : différencier des objets distincts ne présentant pas entre eux de continuité du nuage de point. Deux points situés à une distance inférieure à la distance de recherche sont considérés comme appartenant à un objet unique
- Paramètres :
 - data : nuage de voxels x, y, z (par exemple issu d'une soustraction de deux objets)
 - dist.reaserch : distance de recherche des voxels appartenant à l'objet en cours de traitement
- Output : nuage de voxels x, y, z, ID de l'objet
- Pas de paramètres par défaut



BIBLIOGRAPHIE

- Adler, D., et D. Murdoch, 2011. « rgl : 3D visualization device system (OpenGL), R package version 0.92.798. » <http://CRAN.R-project.org/package=rgl>.
- Barczi, J-F., P. Reffye et Y. Caraglio. 1997. « Essai sur l'identification et la mise en oeuvre des paramètres nécessaires à la simulation d'une architecture végétale : le logiciel amapsim. » In *Barthélémy, D., Bouchon, J., de Reffye, P. (Eds) Modélisation et simulation de l'architecture des végétaux* INRA Editions, p. 205-254.
- Barthélémy, D., C. Edelin et F. Hallé. 1989. « Some architectural aspects of tree ageing » *Annals of Forests Science* vol. 46, no suppl., p. 194s-198s.
- Barthélémy, D. 1991. « Levels of organization and repetition phenomena in seed plants. » *Acta Biotheoretica* vol. 39, no 3-4, p. 309-323.
- Barthélémy, D., et Y. Caraglio. 2007. « Plant Architecture : A Dynamic, Multilevel and Comprehensive Approach to Plant Form, Structure and Ontogeny. » *Annals of Botany* vol. 99, no 3, p. 375-407.
- Bauerle, W. L., J. D. Bowden, M. F. Mcleod et J. E. Toler. 2004. « Modeling intra-crown and intra-canopy interactions in red maple : assessment of light transfer on carbon dioxide and water vapour exchange. » *Tree Physiology* vol. 24, no 5, p. 589-597
- Berninger, F., et E. Nikinmaa. 1997. « Implication of varying pipe model relationships on Scots Pine growth in different climates. » *Functional Ecology* vol. 11, no 2, p. 146-156.
- Binney J. et G. S. Sukhatme. 2009. « 3D Tree Reconstruction from Laser Range Data. » *International Conference on Robotics and Automation* Kobe, Japan, May 12-17, 2009.
- Bréda, N., K. Soudani et J-C. Bergonzini. 2002. « Mesure de l'indice foliaire en forêt. » *ECOFOR* p. 157.
- Browning, D. M., et H. V. Wiant, 1997. « The economic impact of deferring electric utility tree maintenance. » *Journal of Arboriculture* vol. 23, no 3.
- Brown, S. D., D. D. Blevins et J. R. Schott. 2005. « Time-gated topographic LIDAR scene simulation. » *The International Society for Optical Engineering* vol. 5791, p. 342-353

- Bucksch, A., et S. Fleck. 2011. « Automated detection of branch dimensions in woody skeletons of fruit tree canopies. » *Photogrammetric Engineering Remote Sensing* vol. 77, no 3, p. 229240.
- Bucksch, A., et R. Lindenbergh, 2008. « CAMPINO : A skeletonization method for point cloud processing. » *Journal of photogrammetry remote sensing* vol. 63, no 1, p. 115-127.
- Bucksch, A., R. Lindenbergh et M. Menenti. 2010. « SkelTre : robust skeleton extraction from imperfect point clouds. » *The Visual Computer* vol. 26, no 10, p. 12831300.
- Canham, C. D. 1988. « Growth and canopy architecture of shade-tolerant trees : response to canopy gaps. » *Ecology* vol. 69, no 3, p. 786795.
- Canham, C. D., A. C. Finzi, S.W. Pacala et D. H. Burbank. 1994. « Causes and consequences of resource heterogeneity in forest : interspecific variation in light transmission by canopy trees. » *Canadian Journal of Forest Research* vol. 24, no 2, p. 337-349.
- Caraglio, Y., et C. Edelin. 1990. « Architecture et dynamique de la croissance du platane, *Platanus hybrida* Brot. (Platanaceae) fsyn. *Platanus acerifolia* (Aiton). » *Lettres Botaniques* vol. 137, p. 279291.
- Caraglio, Y., et D. Barthélémy. 1997. « Revue critique des termes relatifs à la croissance et à la ramification des tiges des végétaux vasculaires. » In *Barthélémy, D., Bouchon, J., de Reffye, P. (Eds) Modélisation et simulation de l'architecture des végétaux. Paris, France : INRA Editions* p. 11-87.
- Castro e Santos, A. 1980. « Essai de Classification des arbres tropicaux selon leur capacité de reiteration. » *Biotropica* vol. 12, no 3, p. 187-194.
- Chen, H. Y. H., K. Klinka et G. J. Kayahara. 1996. Effects of light on growth, crown architecture, and specific leaf area for naturally established *Pinus contorta* var. *glauca* and *Pseudotsuga menzeii* var. *glauca* saplings. » *Canadian Journal of Forest Research* vol. 26, no 7, p. 1149-1157.
- Côté, J-F., R. A. Fournier et G. W. Frazer. 2011. « A fine-scale architectural model of trees to enhance LiDAR-derived measurements of forest canopy structure. » *Agricultural and forest meteorology* vol. 166-67, p. 72-85.
- Dassot M., T. Constant et M. Fournier. 2011. « The use of terrestrial LiDAR technology in forest science : application fields, benefits and challenges. » *Annals of forest science* vol. 68, no 5, p. 959-974.
- Delagrange, S., P. Montpied, E. Dreyer, C. Messier et H. Sinoquet. 2006. « Does shade improve light interception efficiency ? A comparison among seedlings from shade-tolerant and -intolerant temperate deciduous tree species. » *New Phytologist* vol.

- 172, no 2, p. 293-304.
- Delagrangé, S. et P. Rochon. 2011. « Reconstruction and analysis of a deciduous sapling using digital photographs or terrestrial-LiDAR technology. » *Annals of botany* vol. 108, no 6, p. 991-1000.
- de Reffye, Ph., et F. Houllier. 1997. « Modelling plant growth and architecture : Some recent advances and applications to agronomy and forestry. » *Current Science* vol. 73, no 11, p. 984-992.
- de Reffye, Ph., C. Edelin, J. Francon, M. Jaegerl et C. Puech. 1988. « Plant Models Faithful to Botanical Structure and Development. Computer Graphics, Vol. 22, no 4, p. 151-158. Drénou, C. 2000. Pruning trees : the problem of forks. » *Journal of Arboriculture* vol. 26, no 5, p. 264-269.
- Durrieu, S., T. Allouis, R. A. Fournier, C. Véga et L. Albrecht. 2008. « Spatial quantification of vegetation density from terrestrial laser scanner data for characterization of 3D forest structure at plot level. » *SilviLaser 2008* Sept. 17-19.
- Fleck, S., N. Obertreiber, I. Schmid, M. Brauns, H. F. Jungkunst et C. Leuschner. 2007. « Terrestrial LiDAR measurement for analysing canopy structure in an old-growth forest. » *Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007* Espoo, September 12-14, 2007, Finland.
- Gielen, B., C. Ceulemans, A. Claus, M. Sabatti et R. Ceulemans. 2002. « Crown architecture of populus spp. is differentially modified by free-air CO₂ enrichment. » *New Phytologist* vol. 153, no 1, p. 91-99.
- Goodfellow, J. W., B. Blumreich, et G. Nowacki. 1987. « Tree growth response to line clearance pruning. » *Journal of Arboriculture* vol. 13, no 8, p. 196-200.
- Gorte, B., et N. Pfeifer. 2004. « Structuring Laser-Scanned Trees Using 3D Mathematical Morphology. » *XXth ISPRS Congress : Proceedings of Commission V* Istanbul, Turkey, p.929-933.
- Gorte B., and Winterhalder D., 2004. « Reconstruction of laser-scanned trees using filter operations in the 3D-raster domain. » *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* vol. 36, p.3944.
- Goulet, J., C. Messier et E. Nikinmaa. 2000. « Effect of branch position and light availability on branch segment growth of understory sugar maple and yellow birch saplings. » *Canadian Journal of Botany* vol. 78, no 8, p. 1077-1085.
- Hallé, F., et R. A. A. Oldeman. 1970. « Essai sur l'architecture et la dynamique de croissance des arbres tropicaux. » *Paris. : Masson Cie* vol. 178, p. 634-691.
- Hallé, F. 1986. « Modular Growth in Seed Plants. » *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences A.* vol. 313, no 1159, p. 77-87.

- Henning J.G. et P.J. Radtke. 2006. « Detailed stem measurements of standing trees from ground-based scanning lidar. » *Forest Science* vol. 52, no 1, p. 67-80.
- Hijmans, R. J., et J. van Etten. 2011. « raster : Geographic analysis and modeling with raster data. R package version 1.9-32. » <http://CRAN.Rproject.org/package=raster>.
- Hudaka, A. T., M. A. Lefsky, W. T. Cohena et M. Berterretche. 2002. « Integration of lidar and Landsat ETM+ data for estimating and mapping forest canopy height. » *Remote Sensing of Environment* vol. 82, no 2-3, p. 397-416.
- Hydro-Québec. 2009. « Lignes de distribution, élagage, déboisement, abattage, Clauses techniques particulières. » *Fiabilité du service, Hydro-Québec en fait sa branche*.
- Hydro-Québec. 2010. « Rapport d'analyse de panne pour la cause végétation Bilan 2005-2009. » *Direction Gestion de l'actif Unité Gestion de la végétation Équipe planification*.
- Ishii, H. T., E. D. Ford et M. C. Kennedy. 2007. « Physiological and ecological implications of adaptive reiteration as a mechanism for crown maintenance and longevity. » *Tree Physiology* vol. 27, no 3, p. 455-462.
- Jaeger, M., et Ph. De Reffye. 1992. « Basic concepts of computer simulation of plant growth. » *Journal of biosciences* vol. 17, no 3, p. 275-291.
- Kunzler, G., T. Curt, M. Bouchaud et J. Lepart, 2005. « Growth, mortality, and morphological response of European beech and downy oak along a light gradient in sub-Mediterranean forest. » *Canadian Journal of Forest Research* vol. 35, no 7, p. 1657-1668.
- Koetz, B., F. Morsdorf, G. Sun, K. J. Ranson, K. Itten et B. Allgöwer. 2006. « Inversion of a Lidar Waveform Model for Forest Biophysical Parameter Estimation. » *Geoscience and remote sensing letters* vol. 3, no 1, p. 49-53.
- Kwak, D-A., W-K. Lee et H-K. Cho. 2007. « Estimation of LAI using LIDAR remote sensing in forest. » *Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007* Espoo, September 12-14.
- Lacointe, A. 2000. « Carbon allocation among tree organs : A review of basic processes and representation in functional-structural tree models. » *Annals of Forest Science* vol. 57, no 5-6, p. 521-533.
- Lefrançois, M-L., M. Beaudet et C. Messier. 2008. « Crown openness as influenced by tree and site characteristics for yellow birch , sugar maple and eastern hemlock. » *Canadian Journal of Forest Research* vol. 38, no 3, p. 488-497.
- Lefsky M. et M. McHale. 2008. « Volume estimates of trees with complex architecture from terrestrial laser scanning. » *Journal of Applied Remote Sensing* Vol. 2, no 1.

- Marcelis, L. M. S., et E. Heuvelink. 2007. « Concepts of modeling carbon allocation among plants organs. » *J. Vos, L.F.M. Marcelis, P.H.B. de Visser, P.C. Struik and J.B. Evers (eds.), Functional-Structural Plant Modelling in Crop Production* p. 103-111.
- Marquier, A., et P. Balandier. 2000. « Influence de l'intensité de la taille de formation et de l'élagage sur la croissance en diamètre des branches de noyers hybrides. » *Ingénieries* no 22, p. 63-73.
- Macdonald, P., et J. Du. 2011. « mixdist : Finite Mixture Distribution Models. R package version 0.5-4. » <http://CRAN.R-project.org/package=mixdist>.
- Means, J. E., S. A. Acker, D. J. Harding, J. B. Blair, M. A. Lefsky, W. B. Cohen, M.E Harmon et W. A. McKee. 1999. « Use of Large-Footprint Scanning Airborne Lidar To Estimate Forest Stand Characteristics in the Western Cascades of Oregon. » *Remote Sensing of Environment* vol. 67, no 3, p. 298-308.
- Messier, C., et E. Nikinmaa. 2000. « Effects of light availability and sapling size on the growth, biomass allocation, and crown morphology of understory sugar maple, yellow birch, and beech. » *Ecoscience* vol. 7, no 3, p. 345 -356.
- Miller, R. W., et W. A. Sylvester. 1981. « An economic evaluation of the pruning cycle. » *Journal of Arboriculture* vol. 7, no 4, p. 109-112.
- Millet, J., A. Bouchard et C. Edelin. 1999. « Relationship between architecture and successional status of trees in temperate deciduous forest. » *Ecoscience* vol. 6, no 2, p. 187-203.
- Millet, J. et A. Bouchard. 2003. « Architecture of silver maple and its response to pruning near the power distribution network. » *Canadian Journal of Forest Research* vol. 33, no 4, p. 726-739.
- Morsdorf, F., E. Meier, B. Kötz, K. I. Itten, M. Dobbertin et B. Allgöwer, 2004. « LIDAR-based geometric reconstruction of boreal type forest stands at single tree level for forest and wildland fire management. » *Remote Sensing of Environment* vol. 92, no 3, p. 353-362.
- Niinemets, Ü., N. A. Afas, A. Cescatti, A. Pellis et R. Ceulemans. 2004(a). « Petiole length and biomass investment in support modify light interception efficiency in dense poplar plantations. » *Tree Physiology* vol. 24, no 2, p. 141-154.
- Niinemets, Ü., A. Cescatti et R. Christian. 2004 (b). « Constraints on light interception efficiency due to shoot architecture in broad-leaved *Nothofagus* species. » *Tree Physiology* vol. 24, no 6, p. 617-630.
- Nikinmaa, E., C. Messier, R. Sievänen, J. Perttunen et M. Lehtonen, 2003. « Shoot growth and crown development : effect of crown position in three-dimensional

- simulations. » *Tree Physiology* vol. 23, no 2, p. 129136.
- Nowak, D. J. 1990. « Street tree pruning and removal needs. » *Journal of Arboriculture* vol. 16, no 12, p. 309315.
- Nygren, P., S. Rebottaro et R. Chavarr. 1993. « Application of the pipe model theory to non-destructive estimation of leaf biomass and leaf area of pruned agroforestry trees. » *Agroforestry Systems* vol. 23, no 1, p. 6377.
- Oldeman, R. A. A. 1974. « L'architecture de la forêt guyanaise. » *Office de la recherche scientifique et technique outre-mer* Mémoire no.73.
- Pål I. 2008. « Measurements of Forest Inventory Parameters on Terrestrial Laser Scanning Data Using Digital Geometry and Topology. » *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* vol. 37, no 1, p. 373-380.
- Petritan, A. M., B. Von Lüpke et I. C. Petritan. 2009. « Influence of light availability on growth, leaf morphology and plant architecture of beech (*Fagus sylvatica* L.), maple (*Acer pseudoplatanus* L.) and ash (*Fraxinus excelsior* L.) saplings. » *European Journal of Forest Research* vol. 128, no 1, p. 6174.
- Perttunen, J., R. S. Anen, E. Nikinmaa, H. Salminen et H. Saarenmaa. 1996. « LI-GNUM : A Tree Model Based on Simple Structural Units. » *Annals of Botany* vol. 77, no 1, p. 87-98.
- Pinkard, E. A., C. L. Beadle, N. J. Davidson et M. Battaglia. 1998. « Photosynthetic responses of *Eucalyptus nitens* (Deane and Maiden) Maiden to green pruning. » *Trees* vol. 12, no 3, p. 119-129.
- Pinkard, E. A., et C. L. Beadle. 1998(a). « Regulation of photosynthesis in *Eucalyptus nitens* (Deane and Maiden) Maiden following green pruning. » *Trees* vol. 12, no 6, p. 366376.
- Pinkard, E. A. et C. L. Beadle. 1998(b). « Aboveground biomass partitioning and crown architecture of *Eucalyptus nitens* following green pruning. » *Canadian Journal of Forest Research* vol. 28, no 9, p. 14191428.
- Raimbault, P., et M. Tanguy. 1993. « La gestion des arbres d'ornement. I : Une méthode d'analyse et de diagnostic de la partie aérienne. » *Revue Forestière Française* vol. 45, no 2, p. 97-117.
- Raimbault, P., F. de Jonghe, R. Truan et M. Tanguy. 1995. « La gestion des arbres d'ornement. II : Gestion de la partie aérienne : les principes de la taille longue moderne des arbres d'ornement. » *Revue Forestière Française* vol. 47, no spp.
- Rasmussen, N. H., C. N. Nielsen et F. V. Jorgensen, 2005. « Crown architecture and dynamics in *Abies procera* as influenced by cutting for greenery. » *Trees* vol. 19, no 6, p. 619-627.

- Sievänen, R., E. Nikinmaa, P. Nygren, H. Ozier-Lafontaine, J. Perttunen et H. Hakula, 2000. « Components of functional-structural tree models. » *Annals of Forest Science* vol. 57, no 5-6, p. 399-412.
- Shinozaki, K., K. Yoda, K. Hozumi et T. Kura, 1964. « A quantitative analysis of plant form - The pipe model theory. » *Japanese journal of ecology* Vol. 14, no 3, p. 97-105.
- Smith, K. T. 2006. « Compartmentalization today. » *Arboricultural Journal* vol. 29, no 3, p. 173-184.
- Stancioiu, P. T. et K. L. O'Hara. 2006. « Regeneration growth in different light environments of mixed species, multiaged, mountainous forests of Romania. » *European Journal of Forest Research* vol. 125, no 2, p. 151-162.
- Stephan, J., P. Lauri, N. Dones et N. Haddad, 2007. « Architecture of the pruned tree : Impact of contrasted pruning procedures over 2 years on shoot demography and spatial distribution of leaf area in apple (*Malus domestica*). » *Annals of botany* vol. 99, no 6, p. 1055-1065.
- Stephan, J., H. Sinoquet, N. Donès, N. Haddad et P. Lauri, 2008. « Light interception and partitioning between shoots in apple cultivars influenced by training. » *Tree Physiology* vol. 28, no 3, p. 331-342.
- Strahler, A. H., D. L. P. Jupp, C. E. Woodcock, C. B. Schaaf, T. Yao, F. Zhao, X. Yang, J. Lovell, D. Culvenor, G. Newnham, W. Ni-Miester et W. Boykin-Morris. 2008. « Retrieval of forest structural parameters using a ground-based lidar instrument (Echidna®). » *Canadian Journal of Remote Sensing* Vol. 34, no spp. 2, pp. S426-S440.
- Takenaka, A. 2000. « Shoot growth responses to light microenvironment and correlative inhibition in tree seedlings under a forest canopy. » *Tree Physiology* vol. 20, no 14, p. 987-991.
- Toussaint, A., V. K. de Meerendre, B. Delcroix et J-P. Baudoin. 2002. « Analyse de l'impact physiologique et économique de l'élagage des arbres d'alignement en port libre. » *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement* vol. 6, no 2, p. 99-107.
- Tyree, M., et F. Ewers. 1991. « The hydraulic architecture of trees and other woody plants. » *New Phytologist* vol. 119, no 3, p. 345-360.
- Verroust, A., et F. Lazarus. 2000. « Extracting Skeletal Curves from 3D Scattered Data. » *The Visual Computer* vol. 16, no 1, p. 15-25.
- Vonderach C., T. Voegtle et P. Adler. 2012. « Voxels-based approach for estimating urban tree volume from terrestrial laser scanning data. » *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 25 August 01 September 2012, Melbourne, Australia, Vol. 39.