

MASTER FAGE
Biologie et Ecologie pour la Forêt,
l'Agronomie et l'Environnement

Spécialité
Fonctionnement et Gestion des Ecosystèmes

**EVALUATION DE COMPUTREE,
LOGICIEL D'INVENTAIRE FORESTIER A
PARTIR DE SCANS LASER TERRESTRES**

Aurélie COLIN

Mémoire de stage, soutenu à Nancy le 05/09/2011

Maître de stage : Alexandre PIBOULE, chargé de recherche

ONF, pôle R&D de Nancy, Velaine-en-Haye

REMERCIEMENTS

Pour la réalisation de ce rapport, je tiens à remercier :

- Alexandre Piboule, mon maître de stage, pour son encadrement et pour m'avoir apporté son soutien, ses conseils inspirés de ses nombreuses lectures et une ouverture spirituelle quant à l'utilisation de ggplot,
- Jean-Pierre Renaud, pour son aide précieuse en statistiques et sa bonne humeur permanente dont l'effet sur mon stress s'est révélé significatif.

Pour le déroulement de mon stage :

- Myriam Legay pour m'avoir accueillie au sein du pôle,
- Jérôme Bock pour avoir répondu à mes questions et pour l'ambiance productive qu'il est le seul à savoir créer,
- Anne Jolly, Pascal George, David Bastien et tous les stagiaires pour les conversations enrichissantes que l'on a eues notamment lors des sorties sur le terrain.

SOMMAIRE

I. INTRODUCTION	5
1. L'Office National des Forêts	5
2. Contexte de l'étude.....	5
3. Problématique du stage.....	6
II. INTERET DE L'ETUDE.....	7
1. Le LiDAR terrestre	7
2. Etat de l'art.....	8
III. MATERIELS ET METHODES	9
1. Les jeux de données	9
2. Récolte des données.....	9
a) Protocoles d'inventaire.....	9
b) Protocoles de mesure LiDAR	10
3. Traitement des nuages de points.....	11
a) Prétraitement avec FAROScene®	11
b) Traitement avec Computree.....	12
4. Démarche analytique	13
a) Démarche générale	13
b) Critères d'évaluation.....	14
c) Variables explicatives.....	14
IV. RESULTATS	16
1. Amélioration de l'algorithme	16
a) Analyse qualitative	16
b) Analyse quantitative	19
2. Evaluation du logiciel	21
3. Le multiple-scan	25
V. DISCUSSION	26
VI. CONCLUSION.....	27
 Bibliographie.....	 28

ANNEXE I - Mesures du D130.....	30
ANNEXE II - Protocole LiDAR IFN	31
ANNEXE III - Schéma heuristique	32

I. INTRODUCTION

1. L'OFFICE NATIONAL DES FORETS

Placé sous la tutelle du ministère de l'Agriculture et de la Pêche et du ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire, l'Office National des Forêts (ONF) est un Etablissement Public à caractère Industriel et Commercial (EPIC) créé en 1964. L'ONF est chargé de la gestion des 11 millions d'hectares de forêts publiques françaises (4,7 Mha de forêts domaniales et communales en métropole et 6 Mha dans les DOM) ainsi que des espaces naturels associés à la forêt tels que les tourbières, les dunes et les pelouses alpines.

On peut regrouper les activités de l'ONF en cinq grandes missions :

- la production de bois par une sylviculture durable intégrant le changement climatique, le maintien de la biodiversité, l'optimisation de l'équilibre forêt-gibier, ...
- la vente de la production en bois d'œuvre, en bois d'industrie et en bois-énergie ;
- la protection du territoire et de la forêt par la prévention des risques naturels ou anthropiques ;
- l'accueil du public en forêt par les infrastructures, l'information et la sensibilisation à l'environnement ;
- les activités liées aux partenariats avec tous les responsables de milieux naturels.

L'activité de Recherche et Développement (R&D) menée à l'ONF doit répondre aux nouveaux enjeux de la gestion durable des écosystèmes forestiers. C'est pourquoi elle s'adresse en priorité aux gestionnaires et cherche à être en prise directe avec les besoins du terrain afin de faire face aux aléas environnementaux, économiques et sociaux du XXI^e siècle. La R&D de l'ONF, souvent en partenariat avec des organismes de recherche, est chargée de faire progresser les connaissances et les techniques pour les mettre à disposition des praticiens. Le pôle R&D de Nancy qui m'a accueillie en stage a pour mission de développer des méthodes pour l'aménagement et la sylviculture dans le contexte du changement climatique. Ce pôle est en particulier chargé de la télédétection (aérienne et terrestre) appliquée aux méthodes d'inventaire de la ressource.

2. CONTEXTE DE L'ETUDE

Les inventaires forestiers sont motivés par les divers objectifs que se fixe un gestionnaire selon le contexte spécifique (botanique, entomologie, habitats, dendrométrie, ...) Les méthodes doivent donc y être adaptées. Cependant, la connaissance du « matériel sur pied », c'est-à-dire les caractéristiques dendrométriques des peuplements, est nécessaire pour la majorité des actes de gestion forestière et en particulier pour la sylviculture et l'aménagement. Pour décrire l'état d'une forêt en vue de son aménagement, la méthode d'inventaire retenue traditionnellement comprend :

- la mesure du diamètre à 1m30 (D130) au-dessus du sol de tous les arbres à partir d'un diamètre minimum souvent fixé à 17,5 cm (seuil de pré-comptabilité) ;
- la reconnaissance de l'essence de ces arbres ;

- éventuellement, la mesure de leur hauteur.

Le D130 s'obtient au compas ou au ruban (*annexe I*) et la hauteur au Vertex®. Un volume de bois sur pied peut alors être estimé à partir d'un tarif de cubage. Certaines mesures étant longues à effectuer, les inventaires traditionnels présentent des limites. La courbure et le défilement des arbres, pourtant indicateurs de qualité du bois, sont des exemples de mesures omises lors de ces inventaires.

Les modalités de mise en œuvre dépendent aussi beaucoup du cadre géographique car le coût en temps varie selon la structure du peuplement, le relief du terrain et la dimension du massif. Par exemple, pour une même surface et un même nombre de personnes, l'inventaire d'une futaie en montagne nécessite deux fois plus de temps que l'inventaire d'un taillis-sous-futaie (TSF) en terrain plat. Le temps étant un paramètre décisif, il existe deux façons d'inventorier un massif : l'inventaire pied par pied et l'inventaire par échantillonnage. Le premier consiste à inventorier tout le massif, le second à n'inventorier qu'un échantillon de placettes qui le représente. Ces placettes peuvent être temporaires ou permanentes. Ces dernières nécessitent de relever la position de chaque tige (distance et azimut) pour permettre le suivi de l'évolution d'un peuplement à long terme et le calcul d'un accroissement. Ainsi, bien qu'elles demandent plus de temps à mettre en place, elles fournissent une connaissance plus précise de la production d'une forêt.

3. PROBLEMATIQUE DU STAGE

Dans ce contexte qui nécessite des mesures de plus en plus précises, le LiDAR terrestre, technologie de télédétection laser, apparaît comme un outil prometteur pouvant fournir un pool d'informations important via la numérisation de scènes forestières. La littérature sur l'application de cette technologie aux mesures forestières est déjà bien renseignée par divers travaux mais il demeure de nombreuses améliorations à développer et situations à tester. Le logiciel Computree, en cours de développement au sein du service R&D de l'ONF, s'inscrit dans cette démarche de progrès concernant les techniques d'inventaire forestier. Actuellement, il permet le traitement de nuages de points enregistrés par un scanner laser terrestre afin d'y détecter les arbres et d'estimer leur D130. L'estimation de volumes et de hauteurs, la description de la branchaison, ou encore la reconnaissance des espèces sont autant d'objectifs à atteindre pour répondre aux enjeux contextuels.

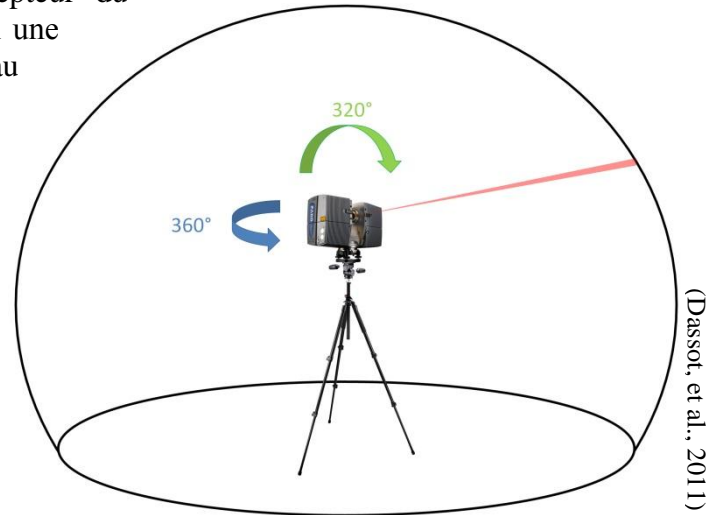
Dans cette étude, il s'agit de démontrer l'intérêt de cette technologie et d'évaluer le logiciel Computree. Sont ainsi évalués, la détection des arbres dans les nuages de points et l'estimation de leur D130. Il est également question de faire évoluer le logiciel en corrigeant les problèmes algorithmiques observés. Pour ce faire, deux jeux de données très différents sont à notre disposition ; l'un a été acquis par l'IFN (Inventaire Forestier National), l'autre par l'ONF. Leur complémentarité permet de réaliser les tests nécessaires à ce travail qui repose sur la comparaison des résultats obtenus avec le logiciel à ceux fournis par des inventaires traditionnels.

II. INTERET DE L'ETUDE

1. LE LIDAR TERRESTRE

Le T-LiDAR (Terrestrial Light Detection And Ranging), ou scanner laser, permet la numérisation d'un espace par balayage d'un rayon laser infrarouge émis dans quasiment toutes les directions grâce aux rotations de l'appareil (Figure 1). Après rencontre avec un objet, le rayon incident est rétrodiffusé vers le récepteur du LiDAR. La distance de l'objet est mesurée selon une technique de décalage de phase entre le faisceau laser émis et celui rétrodiffusé. En y associant la direction visée par l'appareil, on obtient les coordonnées en 3 dimensions de l'obstacle rencontré. Une réflectance, indicateur de l'intensité avec laquelle le signal revient, est également mesurée et attribuée à chaque point. Une image en 3 dimensions de la scène est ainsi obtenue (Figure 2).

Comme il l'a été écrit dans le paragraphe précédent, la méthode d'inventaire dépend des objectifs du gestionnaire et de la superficie à inventorier. Depuis quelques années, le LiDAR terrestre apparaît comme un outil potentiel pour le calcul du capital sur pied et la description de l'état d'une placette, temporaire ou permanente, de quelques centaines de mètres carrés.



(Dassot, et al., 2011)

FIGURE 1 : CHAMP DE BALAYAGE DU LIDAR PHOTON 120 FARO®; EN TOURNANT SUR LUI-MÊME, L'APPAREIL PEUT EMETTRE JUSQU'À 360° HORIZONTALEMENT ET 320° VERTICALEMENT.



FIGURE 2 : VUE 3D D'UN NUAGE DE POINTS REPRESENTANT UNE SCENE FORESTIERE SCANNEE DEPUIS SON CENTRE, LOGICIEL FAROSCENE®.

2. ETAT DE L'ART

Le LiDAR terrestre suscite de plus en plus d'intérêt en sciences et gestion forestières. Appliqué à ce domaine, il permet de numériser de façon rapide, précise et non destructive la structure d'un arbre sur pied ou d'une placette entière. En effet, de nombreux travaux ont déjà démontré l'adéquation de cette technologie laser, pour la modélisation de la géométrie 3D d'un arbre (Thies, et al., 2004) et son impact sur la distribution spatiale des microclimats (der Van, et al., 2009) et des micro-habitats (Michel, et al., 2008) dans les couverts forestiers.

Aussi, l'utilisation du LiDAR pour les mesures d'inventaire forestier fait l'objet d'études depuis près d'une dizaine d'années. Il s'agit d'automatiser l'extraction de paramètres dendrométriques à partir d'un nuage de points. Pour ce faire, la première étape est le calcul du Modèle Numérique de Terrain (MNT) à partir des points les plus bas, c'est-à-dire ceux qui ont les plus petites coordonnées Z dans le nuage. A partir du MNT et en affectant à la couche « sol » une épaisseur arbitraire, on sépare les points appartenant à la végétation de ceux appartenant au sol. Une couche horizontale est extraite entre 1,25 m et 1,35 m de hauteur (Simonse, et al., 2003; Hopkinson, et al., 2004) dans laquelle les sections des troncs sont détectées grâce à différentes techniques de reconnaissance de formes telles que la transformée de Hough (Simonse, et al., 2003; Aschoff, et al., 2004) ou l'ajustement de cercle ou de cylindre par la méthode des moindres carrés (Bienert, et al., 2006; Kiraly, et al., 2007; Maas, et al., 2008). Ces techniques permettent un calcul direct du diamètre des formes détectées correspondant au D130. Aschoff, et al., (2004) réalise la détection des sections de troncs dans plusieurs couches horizontales de hauteurs différentes. Ainsi, un arbre étant censé être constitué de plusieurs cercles successifs alignés selon un axe vertical, on peut appliquer des filtres paramétrables pour supprimer les formes aberrantes telles qu'un cercle dévié par rapport aux autres ou un arbre constitué d'un nombre de cercles trop petit. De plus, le D130 peut être estimé à partir de plusieurs cercles ou de plusieurs cylindres ajustés grâce à une régression linéaire (Thies, et al., 2004).

Le D130 combiné à d'autres paramètres estimés permet le calcul de nombreuses variables forestières comme la surface terrière, la densité, les volumes marchand et total d'un peuplement (Hopkinson, et al., 2004), ou encore la hauteur (Bienert, et al., 2006), le défilement et la courbure des arbres (Thies, et al., 2004). Comparés aux mesures effectuées sur le terrain selon les méthodes d'inventaire traditionnelles, la précision de ces estimations est relative au type de peuplement, à la méthode utilisée pour scanner les placettes et à l'algorithme élaboré pour traiter les nuages de points. Thies, et al. (2004) estime les D130 d'un peuplement mixte de structure irrégulière avec une erreur moyenne de 2,8 cm en simple-scan et de 2,5 cm en multiple-scan et avec des taux de détection respectifs de 22% et 52%. Pour une plus petite placette, Tansey, et al. (2009) obtient un taux de détection de 100% en multiple-scan et présente des estimations de D130 faites avec trois méthodes de détection dont l'ajustement de cercle qui conduit à de meilleurs résultats. Les travaux de Watt, et al. (2005) révèlent que la densité et la distance entre les arbres et le scanner ont une corrélation positive avec l'erreur des résultats. Les hauteurs et les volumes n'ont encore jamais été estimés avec une bonne précision. Il reste ainsi des améliorations à développer et de nombreux peuplements sur lesquels tester cette technologie pour confirmer l'intérêt du LiDAR comme instrument de mesure généralisable à tous les inventaires forestiers.

III. MATERIELS ET METHODES

1. LES JEUX DE DONNEES

Les jeux de données utilisés pour cette étude sont constitués de 110 scans réalisés et mis à notre disposition par l'IFN sur les échelons de Caen, Nancy, Lyon, Bordeaux et Montpellier et de 17 scans que nous avons réalisés en Forêt domaniale de Montiers et en Forêt de Grammont (Meuse, 55). A chaque placette scannée correspond un inventaire dendrométrique auquel ont été comparés les résultats obtenus avec le logiciel Computree. 1135 arbres ont ainsi été observés à partir des scans IFN et 601 arbres à partir des scans OPE.

Les placettes OPE concernent des peuplements de types TSF et futaie adulte d'une densité variant entre 115 et 1360 tiges/ha et d'une grande variété de structure. Leur surface terrière varie entre 3 et 43 m²/ha. Le hêtre, le charme, le chêne et l'érable composent en association ces peuplements, sauf cas de la hêtraie pure. Cet échantillon compte un petit nombre de placettes mais toutes les classes de diamètres pré-comptables y sont exhaustivement inventoriées.

Les placettes scannées par l'IFN constituent un échantillon représentant une plus grande variété de peuplements mais dont l'inventaire n'est pas exhaustif. En effet, à partir d'un certain rayon dans la placette, toutes les catégories de diamètres ne sont pas recensées (cf. §III.2.a)), on parle de « placettes concentriques ». De plus, les arbres dits « simplifiés » bénéficient de mesures allégées : seuls l'essence et le D130 sont relevés. Les coordonnées spatiales de ces arbres dans la placette n'étant pas renseignées, ils ne peuvent pas intégrer le jeu de données pour être comparés avec les arbres détectés numériquement. La densité de ces peuplements est comprise entre 57 et 3595 tiges/ha et la surface terrière entre 3 et 65 m²/ha. 15 placettes représentent des peuplements de conifères, 83 des peuplements de feuillus et 12 des peuplements mixtes. Contrairement à l'échantillon OPE, les perchis y sont représentés. Les principales essences majoritaires sont l'épicéa, le sapin, le douglas, le pin sylvestre et le pin maritime pour les peuplements de conifères. Le chêne vert, le peuplier, le châtaignier, le bouleau, le frêne, le robinier et les essences également présentes dans l'échantillon OPE composent essentiellement les peuplements de feuillus purs et mélangés. 41 des scans IFN ont été réalisés en période de végétation.

2. RECOLTE DES DONNEES

Les protocoles d'inventaire et de mesure LiDAR varient pour les deux jeux de données.

a) PROTOCOLES D'INVENTAIRE

ONF : dans le cadre du survol LiDAR du site de Bure s'intégrant dans le projet de l'Observatoire Pérenne de l'Environnement mis en place par l'ANDRA (Agence Nationale pour la gestion des Déchets RAdioactifs), des inventaires dendrométriques ont été réalisés sur une cinquantaine de placettes :

- **caractéristiques** des tiges (circonférence à 1,30 m, hauteur, essence, ...) pour les jeunes peuplements (15m>H>3m) et les régénérations (H<3m) dans une placette d'un rayon compris entre 6 et 10 m ;
- **caractéristiques** et **position des tiges** (azimut et distance horizontale) pour les peuplements adultes (H>15m) dans une placette d'un rayon de 15 m.

Le sous-étage a été exclu de l'inventaire (est considéré comme sous-étage, toutes les tiges qui ne concurrencent pas la base du houppier des tiges dominantes).

IFN : on relève les **caractéristiques** et la **position** des tiges dont le diamètre à 1,30 m est supérieure ou égale 7,5 cm dans un rayon de :

- 6 m autour du centre de la placette pour les tiges dont le diamètre se trouve dans l'intervalle [7,5-22,5[cm ;
- 9 m autour du centre de la placette pour les tiges dont le diamètre se trouve dans l'intervalle [22,5-37,4[cm ;
- 15 m autour du centre de la placette pour les tiges dont le diamètre est supérieure à 37,4 cm.

b) PROTOCOLES DE MESURE LiDAR

Parmi les 50 placettes inventoriées sur le site de l'OPE, 17 ont été mesurées avec le LiDAR terrestre (échantillon choisi selon la composition, le type et la structure du peuplement, la surface terrière et la densité de tiges de la placette). Les jeunes peuplements et les peuplements en régénération n'ont pas été scannés ; les arbres n'y étant pas spatialisés, ils ne peuvent pas entrer dans le jeu de données pour l'étude du logiciel.

Les 17 placettes OPE ont été scannées en hiver avec le modèle de LiDAR Photon 120 commercialisé par FARO. Cet appareil a été acquis par le laboratoire LERFoB (Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt-Bois) de l'INRA à Champenoux (54) qui l'a mis à notre disposition pour cette étude. L'IFN a utilisé le modèle Photon 80 du même fabricant et a effectué les mesures durant toute l'année. Le protocole suivi par l'IFN pour la mesure des placettes se trouve en *annexe II*, celui que nous avons suivi pour les placettes OPE est décrit ci-après.

o Position des points de mesure

Chaque placette est scannée à partir de 5 points de vue. La première position de scannage est au centre de la placette. Les 4 autres se situent à une distance comprise entre 10 et 12 m du centre dans les directions nord, est, sud et ouest. On détermine ces 4 positions en s'assurant de minimiser un éventuel effet de masque généré par un gros arbre proche. Des jalonnettes sont installées pour matérialiser chaque position de scannage.

o Installation des sphères

Sur chaque placette, on place au moins 5 sphères pour permettre le recalage et la fusion des scans lors du traitement des nuages :

- 1 par terre, au centre;
- 4 sur jalon, entre les différentes positions de scannage.

Afin de faciliter la reconnaissance et la correspondance des sphères dans les scans, un jalon est systématiquement doublé d'un autre. Une ou plusieurs sphères supplémentaires sont installées lorsque la densité du sous-étage est importante. Le positionnement des sphères n'est pas fixe et dépend de chaque situation. Il se fait de façon stratégique afin qu'au moins 3 d'entre elles puissent être visibles dans chaque scan, condition essentielle pour recalibrer ces derniers lors de leur fusion.

o Scannage de la placette

Le premier scannage est effectué depuis le centre de la placette. L'appareil est orienté de manière à ce que le scannage débute au nord. Les autres scannages se font dans l'ordre suivant: nord, est, sud et enfin ouest (Figure 3). Pour ces 4 positions aussi, on veille à ce que le début du

scannage se fasse dans la direction nord pour faciliter le calage du scan avec les données issues de l'inventaire lors de leur comparaison.

L'appareil est configuré pour balayer une plage angulaire de $360^\circ \times 320^\circ$ en résolution 1/4. A une vitesse d'acquisition paramétrée à 122 000 points/seconde (paramètre de qualité de scannage «X-Control» réglé sur 4x), il faut environ 7 minutes pour obtenir un nuage de 44 millions de points. La portée du rayon laser est limitée à 53 mètres (portée maximale : 120 m). Les filtres «Clear Sky» et «Clear Contour» sont activés pour minimiser que la luminosité du soleil et du ciel génère du bruit sur les scans.

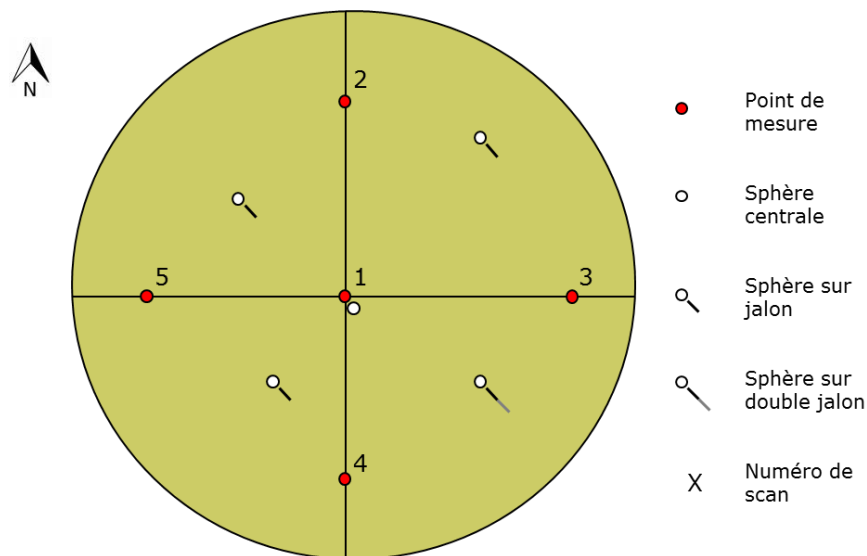


FIGURE 3 : SCHEMA DU PROTOCOLE SUIVI POUR LE SCANNAGE D'UNE PLACETTE OPE.

3. TRAITEMENT DES NUAGES DE POINTS

a) PRETRAITEMENT AVEC FAROSCENE®

Avec le LiDAR Photon 120, le LERFoB a fait l'achat de licences du logiciel FAROScene® qui permet à l'utilisateur de visualiser, filtrer et fusionner les nuages de points enregistrés sur le terrain.

Chaque nuage de notre étude a été prétraité avec FAROScene®, mis à disposition par le LERFoB. En premier lieu, nous leur avons appliqué le filtre standard proposé par le logiciel afin de supprimer les points générés par du bruit :

- les points de faible réflectance ;
- les points isolés.

Tous les scans d'une même placette ont ensuite été fusionnés en y repérant les sphères et en les mettant en correspondance.

Enfin, les nuages de points ont été exportés en fichiers de format .xyb pour permettre leur chargement dans le logiciel Computree. Dans le but d'évaluer l'apport du multiple-scan par rapport au simple-scan, on a effectué un export du nuage fusionné et un autre du nuage enregistré depuis le centre de la placette, non-fusionné.

b) TRAITEMENT AVEC COMPUTREE

La valorisation du potentiel de la technologie laser terrestre pour l'application à la foresterie a motivé le développement d'un outil logiciel. C'est ainsi que le partenariat entre l'ONF et l'ENSAM (Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers), commencé en 2010, a abouti à la conception de Computree. Son principe est l'extraction de paramètres dendrométriques à partir d'un nuage de points enregistré avec un LiDAR terrestre. Pour ce faire, un travail important a porté sur l'automatisation de la détection de tiges au sein d'un nuage. Computree a ainsi fait l'objet de nombreuses améliorations et poursuit encore son évolution. La méthode générale, valable pour les 4 versions présentées dans ce rapport, est décrite ci-après.

Les nuages sont traités un par un avec Computree. Après avoir chargé le fichier, on exécute une série d'étapes, appelée « algorithme ». Son interface originale permet de comparer plusieurs combinaisons d'étapes et ainsi de facilement faire évoluer l'algorithme.

Le traitement du nuage débute par le calcul du MNT à partir des points de coordonnées Z les plus petites afin d'écartier les points du sol. Le nuage, ne comprenant ainsi que des points décrivant la végétation, est ensuite découpé en couches de 1 cm d'épaisseur. Dans chaque couche, les points distants de moins de 3 centimètres sont regroupés en « clusters ». Sur chacun de ces groupes de points, est ajusté un cercle par la méthode des moindres carrés. Les clusters composés de moins de 3 points sont supprimés ainsi que ceux dont le cercle est isolé ou mal ajusté. Pour reconstituer les arbres, les groupes sont reliés entre eux en « sections » selon leur axe vertical et leur distance. Parmi ces sections, celles décrites par moins de 20 cercles sont supprimées. Au sein d'une section, les points supprimés par les filtres précédents, se trouvant entre deux clusters sont récupérés pour recouvrer le maximum d'information sur l'arbre. Les sections sont réunies sur des critères de distance afin de former des arbres complets. Enfin, le D130 (par rapport au MNT) de chacun d'eux est calculé. Toutes les étapes de l'algorithme sont illustrées par la figure 4. Une fois l'algorithme exécuté,

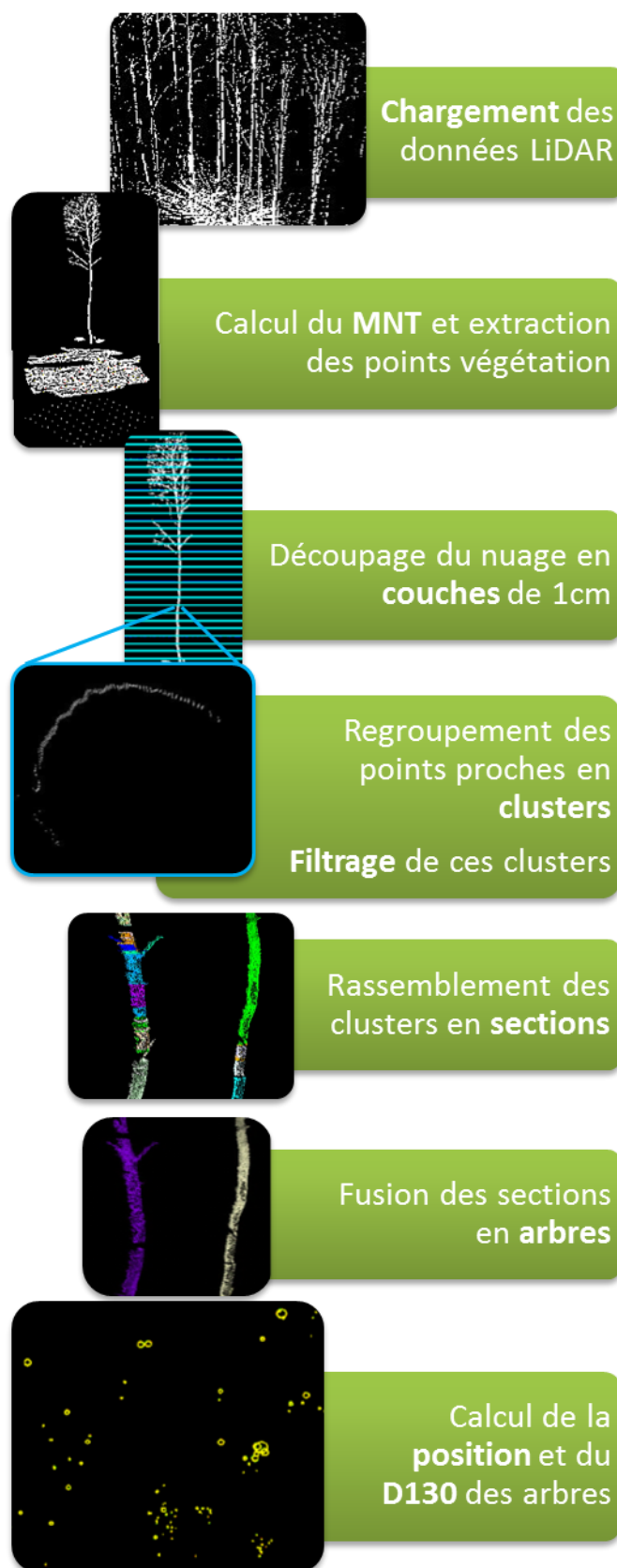


FIGURE 4 : ORGANIGRAMME ILLUSTRE DES ETAPES DE L'ALGORITHME DE COMPUTREE.

peuvent s'afficher dans la fenêtre graphique les arbres détectés et leur diamètre représenté par un cercle proportionnel au D130.

Afin de comparer les résultats inventaire/logiciel, Computree permet le chargement d'un fichier contenant les données terrain de référence à savoir, la distance, l'azimut et le D130 des arbres inventoriés. Les cercles représentant cette fois les diamètres inventaires sont alors visibles dans la fenêtre graphique selon leur position. La correspondance des arbres inventoriés avec les arbres détectés numériquement peut ainsi être établie. Le résultat de cette correspondance est exporté en fichier texte pour analyse.

4. DEMARCHE ANALYTIQUE

a) DEMARCHE GENERALE

Les deux jeux de données IFN et OPE dont nous disposons pour cette étude ont été analysés indépendamment car leur construction est différente. Leur complémentarité est résumée dans le [tableau 1](#) via leurs avantages et inconvénients respectifs. Par conséquent, le premier a servi à faire évoluer le logiciel au fil des versions via une démarche qualitative : son petit nombre de placettes contenant un grand nombre d'arbres a permis, en un temps relativement court, d'être traité à 4 reprises et de faire de nombreuses observations quant aux problèmes algorithmiques. Il a également été le support d'analyses statistiques pour apprécier chacune des versions et mettre en évidence leur évolution. Ces deux démarches conjuguées ont conduit à l'élaboration successive des versions 2, 3 et 4.

Le jeu de données IFN n'a été utilisé que dans la démarche analytique quantitative. Il a permis de tester les réponses du logiciel sur une grande variété de peuplements dont les données numériques ont été acquises dans diverses conditions.

TABLEAU 1 : AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES DEUX JEUX DE DONNEES POUR L'ETUDE.

	OPE	IFN
AVANTAGES	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nombre d'arbres par placette important ▪ Tous les diamètres sont inventoriés sur toute la surface de la placette 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Grande variété de peuplements ▪ Grand nombre de placettes ▪ Conditions d'acquisition diverses
INCONVENIENTS	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Variété de peuplements limitée à un massif ▪ Petit nombre de placettes 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Peu d'arbres à comparer ▪ Tous les diamètres ne sont pas inventoriés à toutes les distances

b) CRITERES D'EVALUATION

Les deux jeux de données ont cependant été analysés selon les mêmes critères d'évaluation :

- la détection et l'écart de l'estimation du D130, à l'échelle de l'arbre ;
- le taux de détection et la RMSE du D130 (Root Mean Square Error), à l'échelle de la placette. La RMSE est un indicateur d'écart entre deux valeurs, elle s'obtient en calculant la racine carrée de la moyenne des carrés des écarts.

Ces critères ont été calculés à partir des données fournies par l'inventaire dendrométrique, considérées comme valeurs de référence, grâce à l'association faite entre les arbres numériques et inventaires sous Computree. Cette association s'est d'ailleurs révélée quelques fois délicate dans les cas où les arbres étaient détectés mais fusionnés à d'autres. Pour le traitement des placettes OPE, ces arbres ont été comptés parmi les détectés considérant que l'algorithme avait correctement décelé ces points comme appartenant à des tiges. Cela a pour conséquence une mauvaise estimation du D130 dans la plupart de ces cas (Figure 5) mais a permis d'évaluer l'efficacité de la méthode de détection. Par contre, dans l'analyse qui est faite avec les placettes de l'IFN, la décision a été prise de compter ces arbres comme non-détectés pour ne pas imputer à la méthode de calcul du D130 de mauvaises estimations dues en réalité à une non-individualisation.

c) VARIABLES EXPLICATIVES

Dans le but d'évaluer le logiciel et d'étudier les effets des caractéristiques de chaque individu et des peuplements, on a tenté d'expliquer l'erreur des résultats par des variables dont certaines ont été apportées par la bibliographie.

On a testé, à l'échelle de l'arbre, les effets que pouvaient avoir les variables suivantes sur les critères d'évaluation :

- L'essence : les propriétés de l'écorce étant différentes selon l'espèce, certaines ont peut-être une influence sur la rétrodiffusion du rayon laser ;
- Le D130 inventorié ;
- La distance entre l'arbre et le centre de la placette ;
- Le taux d'occlusion (testé uniquement sur le jeu de l'OPE) : c'est l'occlusion provoquée par tous les arbres inventoriés se trouvant entre le centre de la placette et l'arbre considéré par rapport à l'angle qu'il forme avec le scanner. C'est donc la proportion masquée du D130 de l'arbre. Ce taux est calculé à partir des arbres inventoriés, il ne rend donc pas compte de l'occlusion provoquée par le sous-étage éventuel. L'inventaire non-exhaustif du jeu IFN n'a pas permis le calcul de cette variable ;
- L'indice d'inclinaison : il est estimé à partir du nuage de points par le logiciel grâce à l'axe du squelette de l'arbre détecté ;
- La RMSE de la régression linéaire sur laquelle repose l'estimation du D130.

Cette dernière variable, disponible avec les versions 3 et 4 uniquement, n'est testée que sur l'écart du D130 ; il en est de même pour l'indice d'inclinaison bien qu'il aurait été pertinent

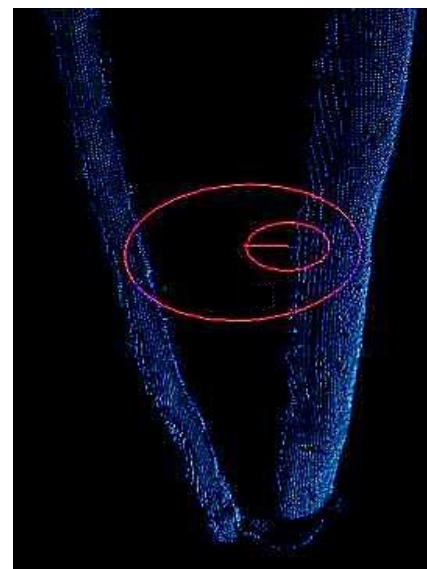


FIGURE 5 : ARBRES FUSIONNES - LES SECTIONS ONT ETE REUNIES EN UN SEUL ARBRE ENTRAINANT UN CALCUL DE DIAMETRE BIAISE.

de le tester sur la détection (il n'est pas calculable pour les arbres non détectés et n'a pas été mesuré sur le terrain).

A l'échelle des placettes, on distingue 3 types de variables testées. Celles relatives au peuplement calculées à partir des données terrain sont les suivantes :

- La composition : « Feuillu », « Mixte », « Résineux » ;
- Le type de peuplement : « Futaie régulière », « Futaie irrégulière », « TSF », « Taillis » ;
- La densité : nombres de tiges par hectare ;
- La surface terrière : somme des surfaces de la section à 1m30 des arbres (m²) par hectare ;
- Le pourcentage de perches : proportion de tiges dont le D130 est inférieur à 17,5cm ;
- Le pourcentage de petit-bois : proportion de tiges dont le D130 est compris entre 17,5 et 27,5 cm pour l'IFN et entre 17,5 et 37,5 cm pour l'ONF;
- Le pourcentage de moyen-bois : proportion de tiges dont le D130 est compris entre 27,5 et 37,5 cm pour l'IFN et entre 37,5 et 47,5 cm pour l'ONF;
- Le pourcentage de gros-bois : proportion de tiges dont le D130 est supérieur à 37,5cm pour l'IFN et à 47,5 pour l'ONF.

Deux autres variables qui décrivent également le peuplement sont calculées à partir des données LiDAR sous Computree :

- L'indice de relief du terrain : différence entre le point le plus haut et le point le plus bas du MNT ;
- L'indice du sous-étage : nombre de points n'ayant pas été attribués à des tiges entre 1 m et 1 m 60, depuis le MNT.

La dernière catégorie concerne la méthode avec laquelle ont été scannées les placettes :

- La saison : période à laquelle a été scannée la placette (« hors-feuilles », « en feuilles »). Les peuplements de conifères sont notés « conifères », la saison de végétation n'ayant pas d'impact sur la qualité de ces scans. L'effet de cette variable n'est testé que pour le jeu de données IFN, les scannages OPE ne s'étant effectués qu'en hiver.
- L'apport du multiple-scan, étudié avec le jeu de données OPE uniquement.

IV. RESULTATS

1. AMELIORATION DE L'ALGORITHME

a) ANALYSE QUALITATIVE

L'analyse des nuages de points OPE sous la 1^{ère}, 2^{ème} puis 3^{ème} version (V1, V2, V3) de Computree, a montré certains problèmes algorithmiques. Leur étude a conduit à la 4^{ème} version (V4) du logiciel par modification, suppression ou création d'étapes dans l'algorithme.

Une première série de problèmes concernait la génération du MNT. En effet, après calcul de la grille des coordonnées Z minimum, un filtre de densité de points au m² permet d'éliminer les points aberrants, correspondant à des zones sans points scannés sur le sol. Il en résulte des valeurs manquantes devant être interpolées. En V1, la méthode d'interpolation était relativement simple (moyenne des voisins les plus proches dans huit directions cardinales). Cela conduisait à des irrégularités dans le MNT (Figure 6, en haut), biaisant la hauteur du tronc à laquelle était calculé le diamètre. A partir de V2, le MNT est interpolé grâce à la méthode de triangulation des points les plus bas dans le nuage (Figure 6, au milieu). Cette méthode permet un meilleur lissage mais elle reste sensible à des points aberrants non éliminés par le filtre de densité. Dans la V3 et la V4, elle est complétée d'un contrôle de

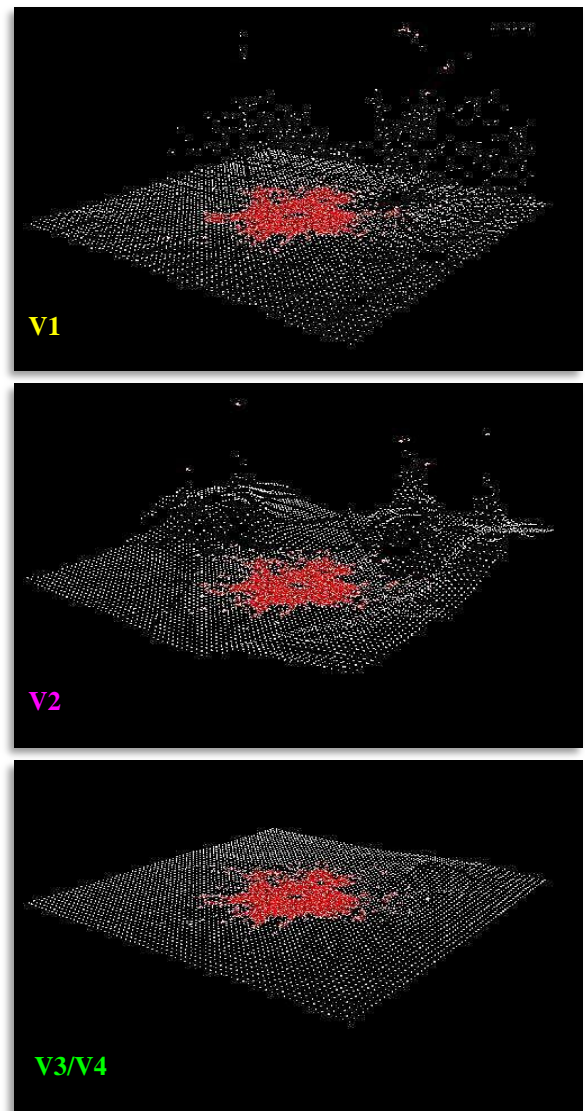


FIGURE 6 : MNT – EN ROUGE, LES POINTS SOL A L'ORIGINE DU MNT. EN BLANC, LES POINTS DU MNT GENERE. A PARTIR DE V3, LES POINTS SOL SONT FILTRES.

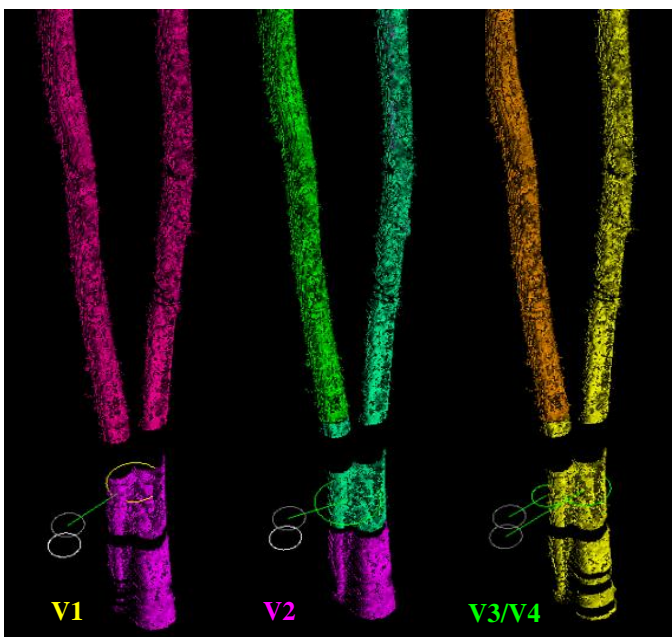


FIGURE 7: LA LOGIQUE DE BRANCHAISON PERMET LA DETECTION DE 2 TIGES (V2, V3 ET V4); LE CALCUL D'UN DIAMETRE EST RENDU POSSIBLE MEME SI LA TIGE N'EST PAS DECRITE EN DESSOUS DE 1M30 A PARTIR DE LA V3.

cohérence, entre chaque point et ses voisins, qui supprime les points de la végétation considérés à tort comme des points du sol (Figure 6, en bas).

Une seconde famille de problèmes provient des arbres proches de quelques centimètres à la base du tronc, qui étaient fréquemment confondus en une seule section. Il en résultait un diamètre largement surestimé pour l'un et une non-détection pour l'autre. Le cas d'un arbre fourchu à moins d'1 m 30 avait les mêmes conséquences (Figure 7). La

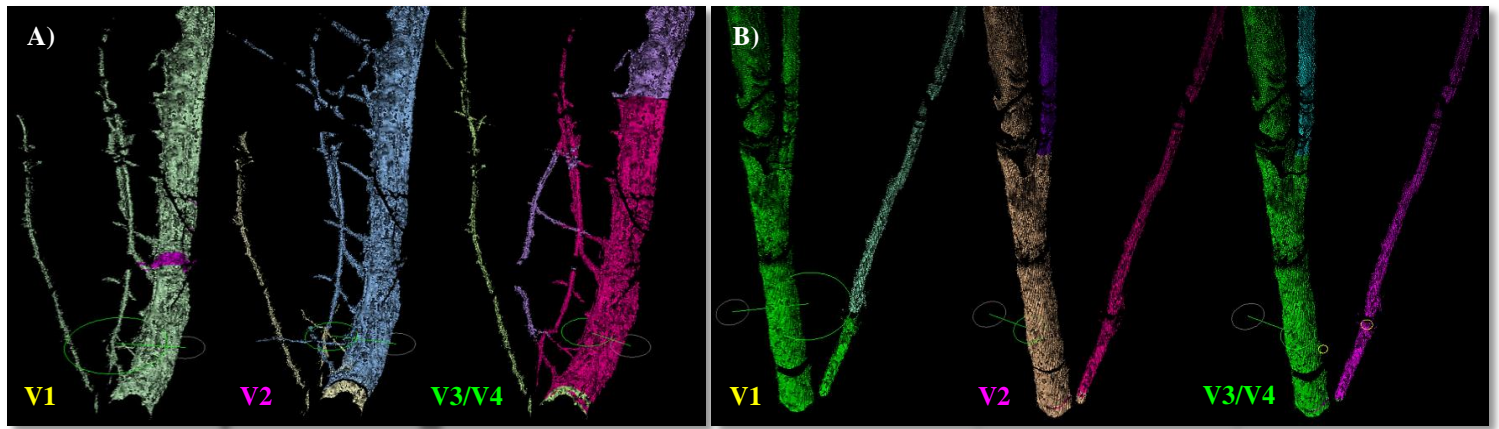


FIGURE 8 : INDIVIDUALISATION DES TRONCS - A) DES BRANCHES DE BASSE-HAUTEUR BIAISENT CONSIDERABLEMENT L'ESTIMATION DU DIAMETRE DANS V1, L'ISOLEMENT DU TRONC PERMET UNE MEILLEUR ESTIMATION DU DIAMETRE DANS V2, V3 (ET V4) ; B) LES PERCHES, MEME TRES PROCHES DE LA BASE DU TRONC, SONT DETECTEES SEPAREREMENT DANS V2, V3 (ET V4).

fusion avec une perche ou une branche de basse hauteur entraînant un diamètre surestimé mais pas de non-détection (Figure 8). Pour corriger ces problèmes, l'idée de reconstruire le squelette de l'arbre et donc de distinguer le tronc des branches est adoptée à partir de la V2. Le principe de la fusion des sections ne repose donc plus uniquement sur un critère de distance et prend aussi en compte leur axe pour contrôler leur continuité. Dans la V3, le squelette résultant de la fusion des sections est en plus lissé. Par ailleurs, cette modification a permis de corriger les arbres dont le tronc était constitué par plusieurs sections (Figure 10). Chaque section conduisant au calcul d'un diamètre, un seul arbre en générerait plusieurs. De plus, l'estimation de ces diamètres était d'une précision relative à la taille de ses sections.

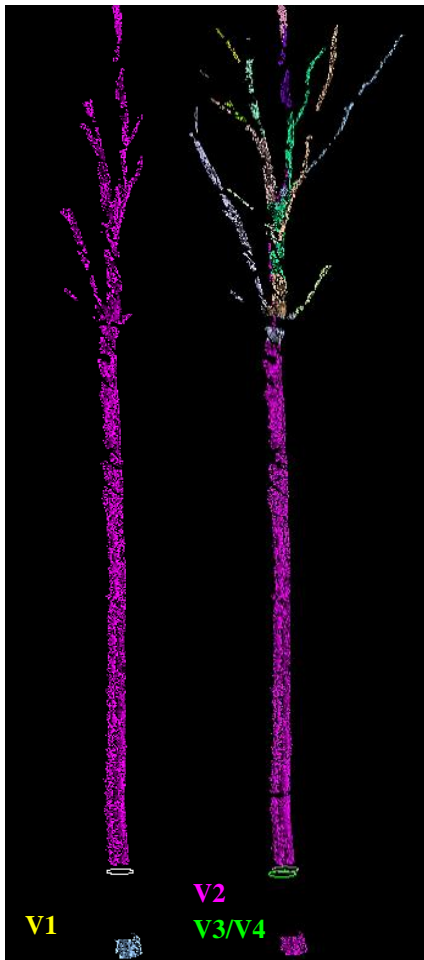


FIGURE 9 : A PARTIR DE LA VERSION 2, LA CONTINUITE INDUITE PAR LA SQUELETTISATION PERMET L'UNIFICATION DES SECTIONS ET LE CALCUL D'UN DIAMETRE MALGRE LE MANQUE DE POINTS ; LES BRANCHES DU HOUPPIER SONT MIEUX DETECTEES ET SONT SEPARERES DE LA TIGE.

Des problèmes se rapportant à la visibilité des arbres ont également été répertoriés dans le nuage. En effet, un certain nombre d'arbres sont occultés par d'autres ou par un sous-étage dense (Figure 11). Si aucune solution algorithmique n'est envisageable pour pallier l'absence totale d'un arbre dans le nuage, il en est autrement des arbres dont la surface est peu décrite dans le nuage, mais malgré tout présente. Ainsi, à partir de V3, un D130 est estimé même pour les sections n'ayant pas groupe de points à proximité de 1 m 30 (Figure 9).

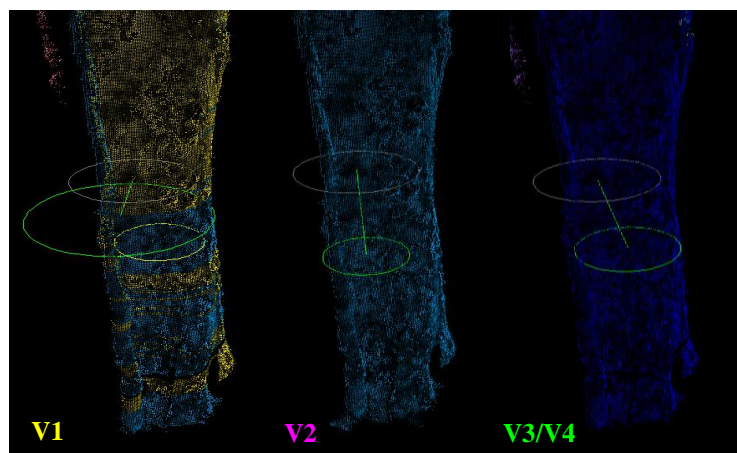
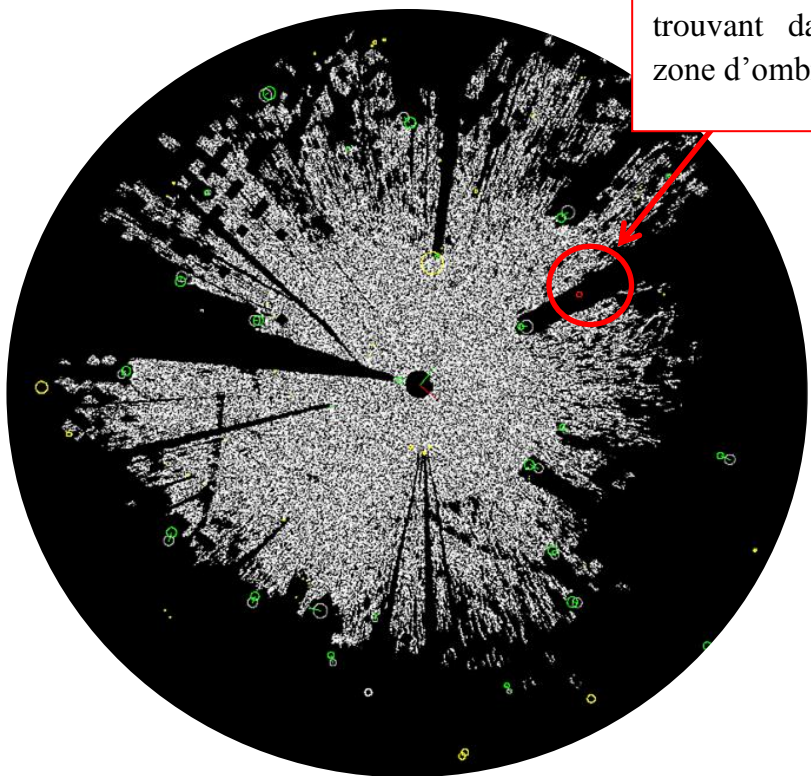


FIGURE 10 : FUSION DES SECTIONS - LE TRONC EST DECRIT PAR 2 SECTIONS DANS V1, 2 DIAMETRES SONT CALCULES ; L'ESTIMATION DU D130 DANS V3 (ET V4) EST PLUS REPRESENTATIVE DE LA REALITE.

Arbre inventorié se trouvant dans une zone d'ombre

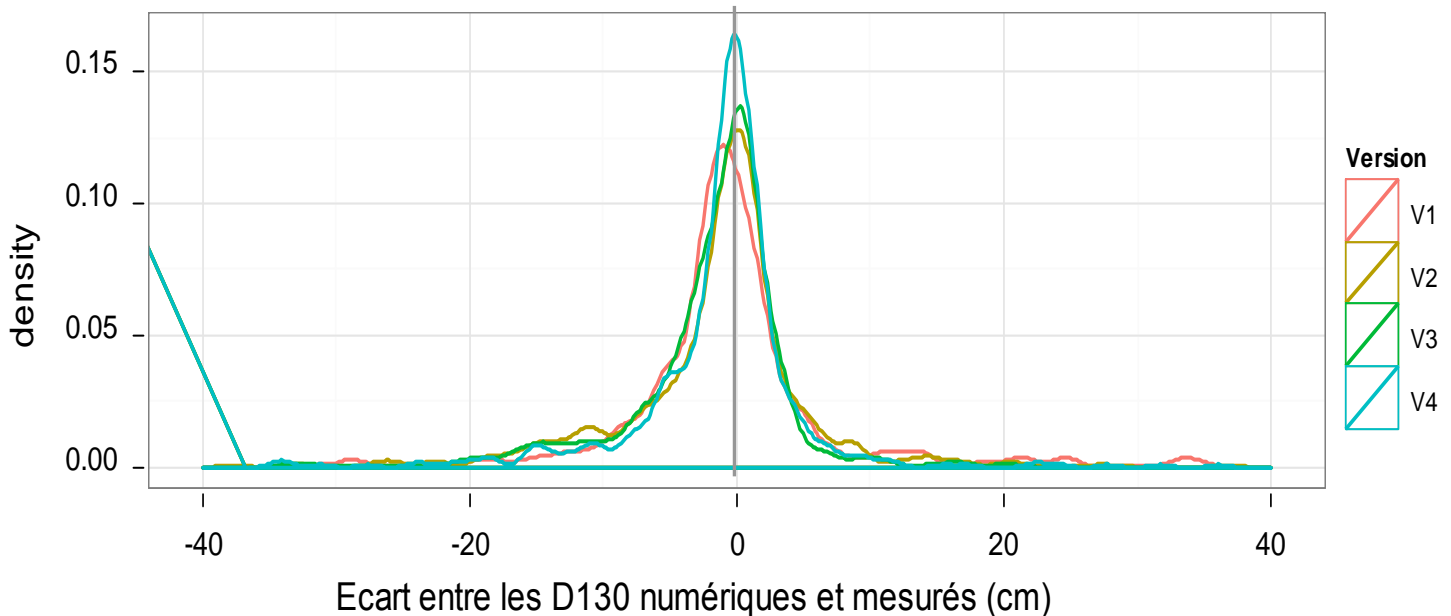
FIGURE 11 : POINTS SOL VUS DE DESSUS – LES GROS ARBRES PROCHES DU SCANNER ENGENDRENT UNE ZONE D'OMBRE IMPORTANTE.



Les corrections énoncées ci-dessus avaient principalement pour objectif d'améliorer la détection et l'individualisation des tiges qui avaient également une incidence, indirecte, sur l'estimation du diamètre. Les dernières modifications de l'algorithme (de V3 à V4) ont porté sur la méthode de calcul du D130. En V1 et V2, le D130 est obtenu en calculant la moyenne des cercles se situant entre 1m10 et 1m50. A partir de V3, tous les cercles compris entre 0 et 3 m 30 sont utilisés. Une régression linéaire du diamètre de ces cercles en fonction de la hauteur permet de déterminer le défilement du tronc et d'interpoler à 1 m 30 son diamètre. Bien que cette méthode ait conduit à des écarts plus faibles pour l'ensemble de l'échantillon, l'estimation des gros-bois s'était sensiblement dégradée. Cette mauvaise estimation était due à l'ajustement de cercles sur un petit nombre de points (Figure 12), le bas du tronc étant souvent occulté par divers objets du sol. Ainsi, la régression linéaire, biaisée par ces petits cercles, n'était pas représentative du défilement réel et entraînait une sous-estimation des diamètres. C'est pourquoi, la V4 dispose d'un critère afin que ne soient pas pris en compte dans la régression linéaire les cercles de diamètre considérablement différent des autres. Les répercussions de cette dernière version sur l'estimation des diamètres sont peu visibles dans le nuage mais elles le sont à l'échelle de l'échantillon. En effet, comme pour chaque version, cette dernière a conduit à réduire les écarts de l'estimation du D130 avec le D130 mesuré de l'ensemble des 588 arbres. Le graphique 1 illustre l'évolution de la distribution de ces écarts au fil des versions. On constate un resserrement progressif de cette distribution autour de 0, de la V1 à la V4.

FIGURE 12 : CERCLES AJUSTES LE LONG DU TRONC - CES CERCLES SONT UTILISES POUR LE CALCUL DU DEFILEMENT VIA UNE REGRESSION LINAIRE. LES CERCLES ABERRANTS A LA BASE DU TRONC INFLUENCENT CETTE REGRESSION.

Distribution des écarts du D130 pour les 4 versions

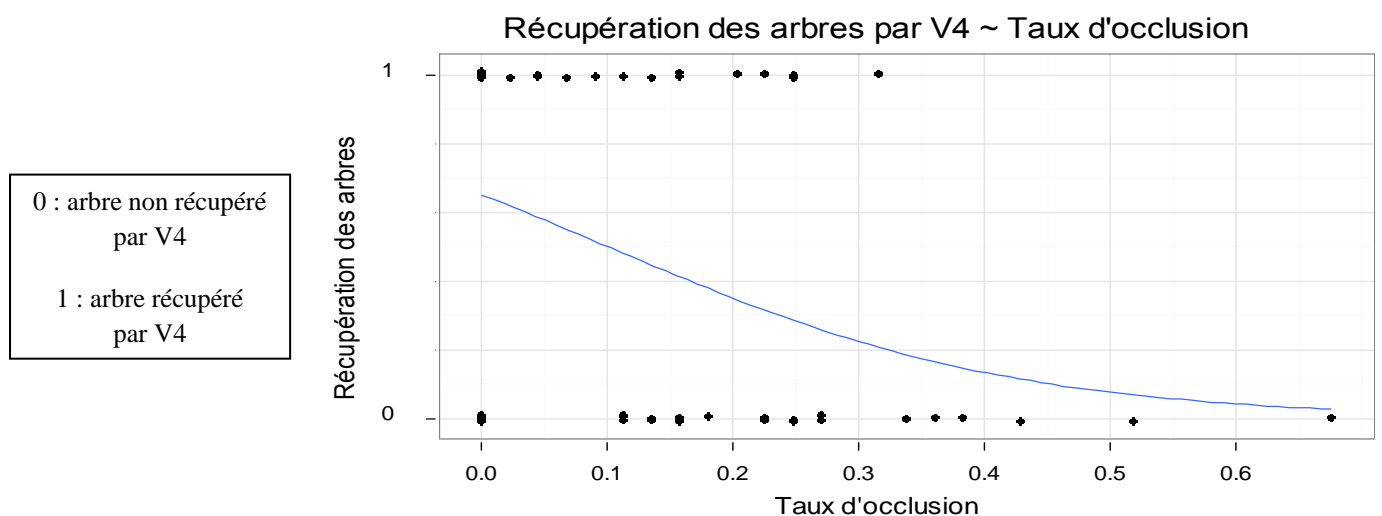


GRAPHIQUE 1 : DISTRIBUTION DES ECARTS DE L'ESTIMATION DU D130 AVEC COMPUTREE – CHAQUE VERSION FOURNIT DES ESTIMATIONS PROCHES DES VALEURS DE REFERENCE PLUS NOMBREUSES QUE LA PRECEDENTE.

b) ANALYSE QUANTITATIVE

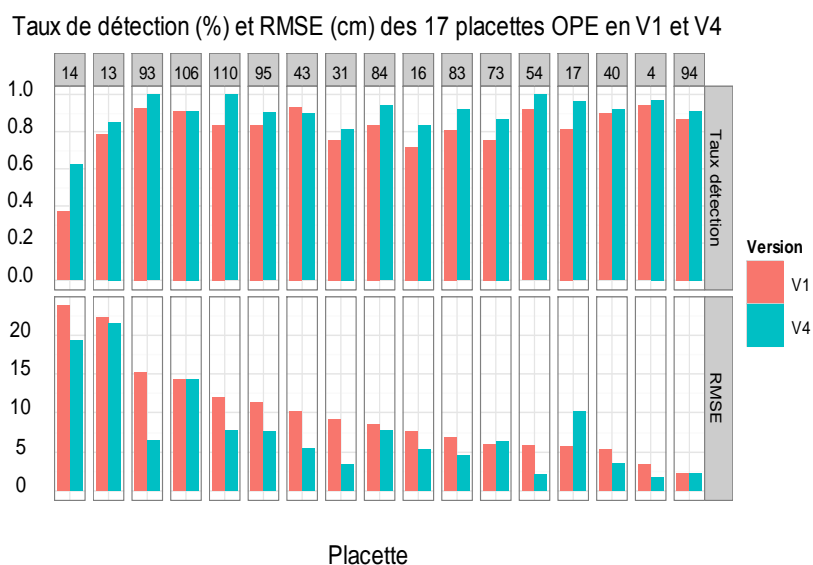
Les corrections appliquées à l'algorithme du logiciel à partir des observations précédentes ont entraîné des résultats différents de la 1^{ère} version. Est exposée dans ce paragraphe, la comparaison des résultats obtenus en V1 avec ceux obtenus en V4.

Tout d'abord, parmi les 106 arbres non détectés en V1, 57 le sont en V4. La régression logistique, réalisée sur ces 106 arbres uniquement, révèle qu'il y a un effet significatif de l'angle d'occlusion sur la détection de ces arbres en V4. Selon le modèle, les arbres avec un taux d'occlusion inférieur à 10% ont une probabilité supérieure à 50% d'être récupérés en V4 (Graphique 2). Les relations entre le gain de détection et la distance ou le D130 n'ont pas pu être mis en évidence. A l'échelle globale, le taux de détection est amélioré par la V4 pour 15 placettes, inchangé pour une et diminué de 3% pour la dernière (Graphique 3). Il atteint 100% pour 3 d'entre elles alors que la V1 fournit un taux de détection maximum de 94,4 %. En moyenne, la V4 détecte 8% d'arbres en plus. Ainsi, le taux de détection moyen obtenu en V4 vaut 90,4%. Il est significativement plus élevé qu'en V1 (test de student pour échantillons appariés). Ainsi, l'évolution de la V1 à la V4 a abouti à une amélioration de la détection des arbres, principalement par une meilleure identification des arbres partiellement masqués.



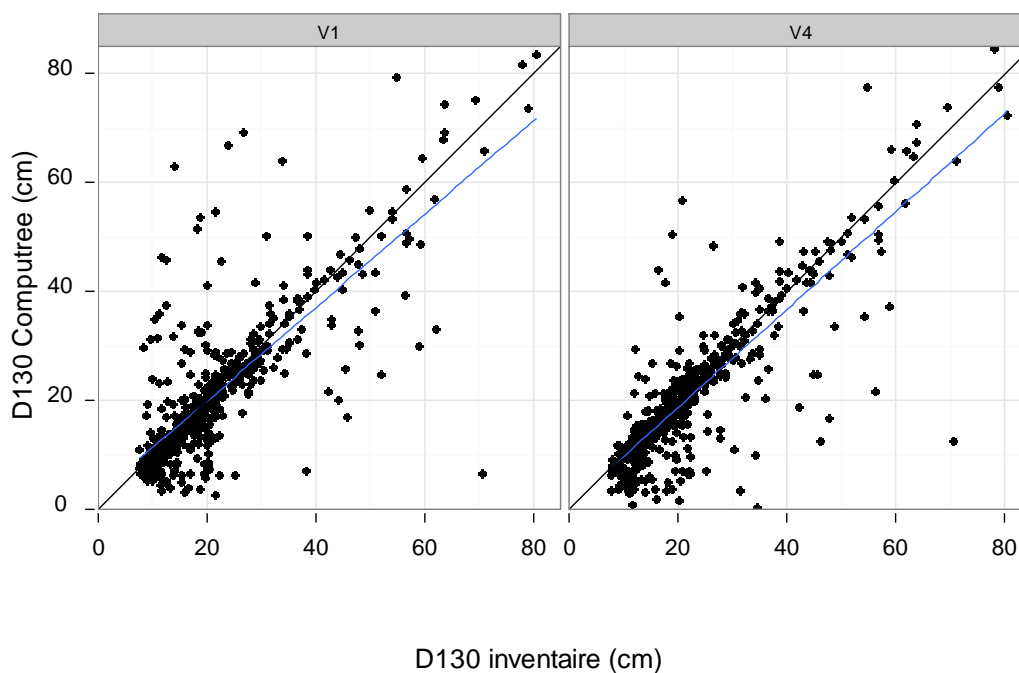
GRAPHIQUE 2 : MODELE LOGISTIQUE EXPLIQUANT L'EFFET DE L'ANGLE D'OCCLUSION SUR LA RECUPERATION DES ARBRES NON-DETECTES EN V1.

Concernant le D130, aucun test statistique n'a pu démontrer que les écarts entre les D130 numériques et mesurés, à l'échelle des arbres, étaient significativement différents entre les deux versions. Cependant, la distribution des écarts s'est considérablement resserrée autour de 0 (cf. Graphique 1, §IV.1.a)). De plus, la proportion d'erreurs très fortes semble avoir diminué, notamment pour les petits-bois. Les gros-bois, par contre, présentent encore une estimation éloignée de la mesure de référence (Graphique 4). A l'échelle des 17 placettes, la RMSE est significativement plus basse en V4 qu'en V1 (test de student pour échantillons appariés). En effet, la moyenne des RMSE est de 10,0 cm en V1 alors qu'elle n'est que de 7,6 cm en V4. Toutefois, la RMSE a augmenté de quelques centimètres pour 2 placettes. (Graphique 3).



GRAPHIQUE 3 : BARPLOT DES TAUX DE DETECTION ET DES RMSE SUR L'ESTIMATION DU D130 OBTENUS AVEC LES VERSIONS 1 ET 4 POUR LES 17 PLACETTES DE L'ECHANTILLON OPE.

Estimation du D130 avec Computree = f (D130 inventaire mesuré)

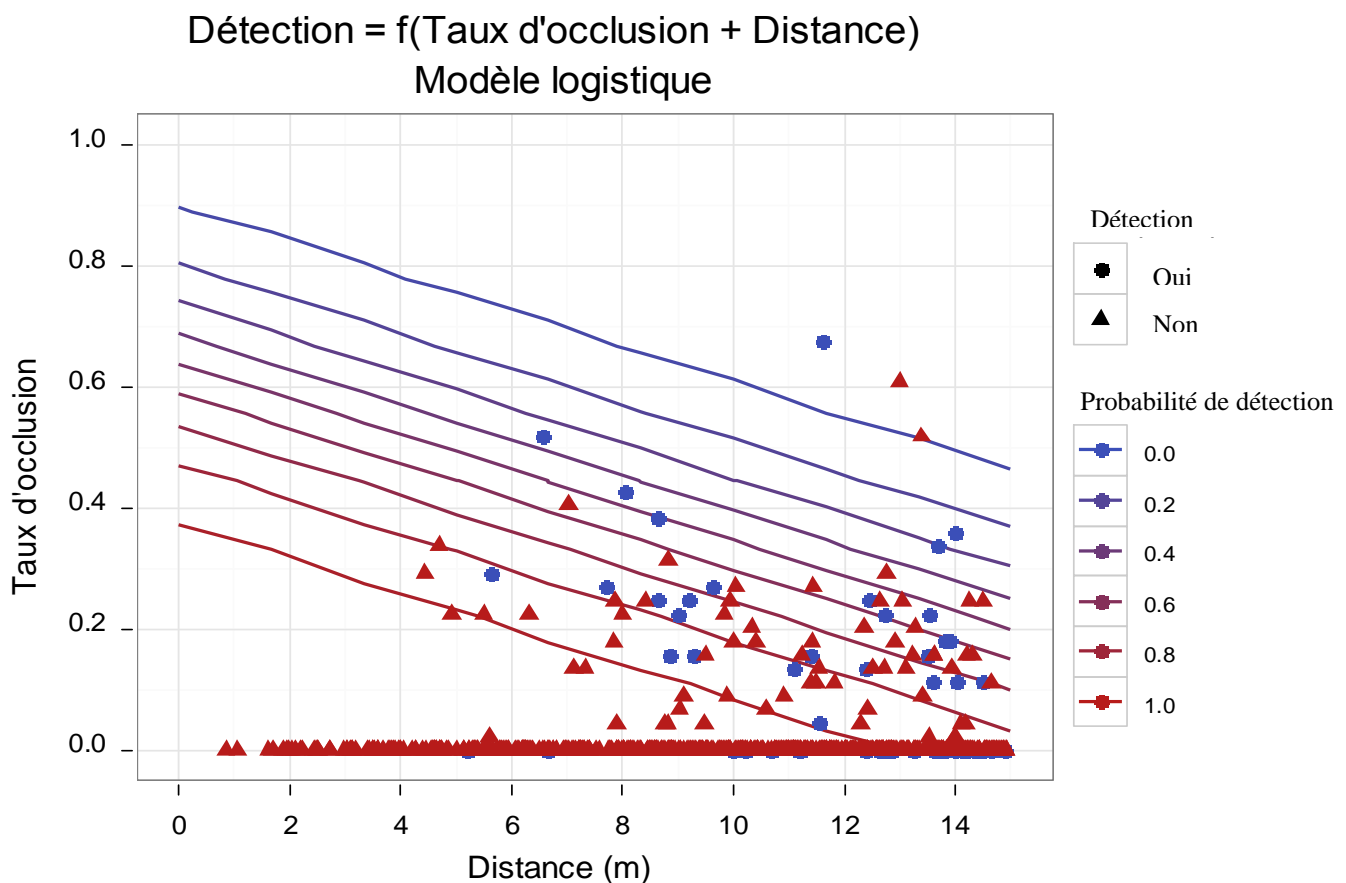


GRAPHIQUE 4 : DIAMETRES ESTIMES AVEC COMPUTREE VERSUS DIAMETRES MESURES SUR LE TERRAIN.

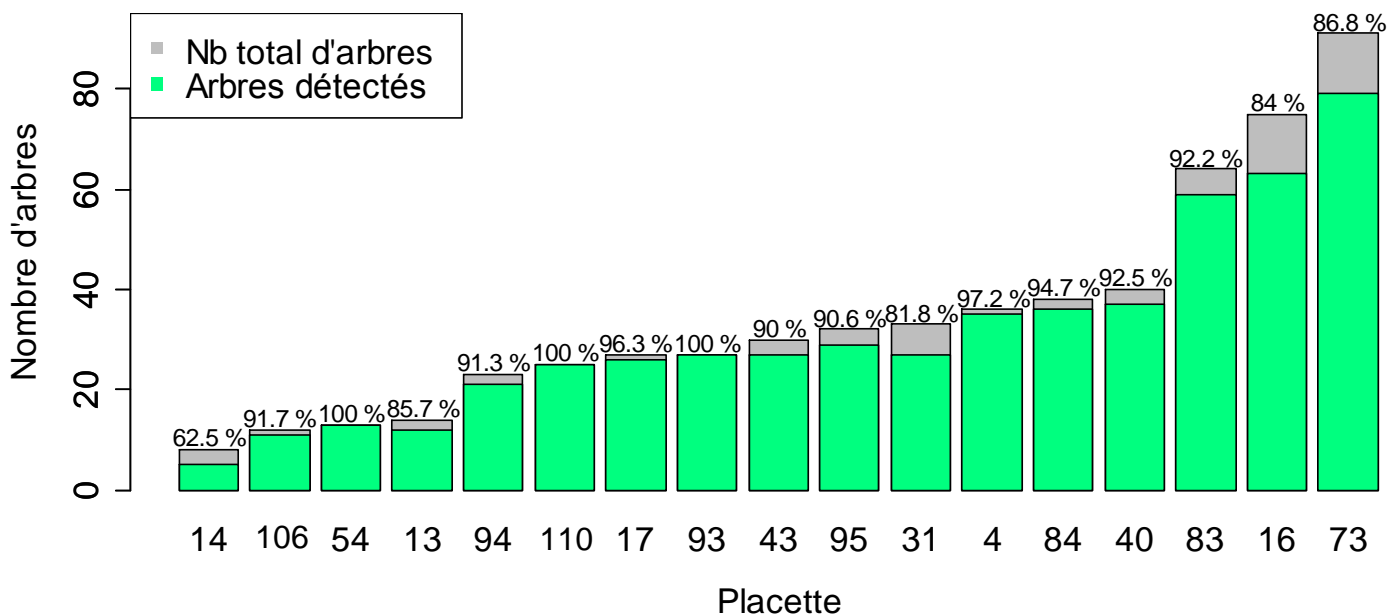
2. EVALUATION DU LOGICIEL

i. OPE

Le traitement des nuages de points OPE en V4 aboutit à la détection de 90% des 588 arbres que compte l'échantillon. La régression logistique réalisée à partir des variables explicatives révèle un effet très significatif de la distance et du taux d'occlusion sur la détection des arbres. Ces deux variables intégrées dans le même modèle restent très fortement significatives. Ce modèle démontre que la probabilité de détection d'un arbre se dégrade quand la distance devient importante et l'occlusion supérieure à 0 (Graphique 5). En effet, selon le modèle, un arbre qui présente 10% d'occlusion, doit se trouver à une distance inférieure à 9 m du centre pour avoir une probabilité maximale d'être détecté. De même, un arbre se situant à plus de 12 m ne doit être occulté par aucun arbre pour maximiser sa détection. Aucun effet caractéristique de la placette n'a pu être mis en évidence étant donnée le petit nombre de placettes observées. Le graphique 6 illustre le taux de détection obtenu pour chacune d'elles. La placette 14 présente un taux particulièrement bas, les arbres y sont peu nombreux et se trouvent tous en bordure de placette.



GRAPHIQUE 5 : REPRESENTATION EN COURBES DE NIVEAU DES PROBABILITES DE DETECTION DU MODELE EN FONCTION DE CES DEUX VARIABLES. LA DETECTION OU L'ABSENCE DE DETECTION OBSERVEE EST REPRESENTEE PAR DES POINTS.



GRAPHIQUE 6 : DIAGRAMME REPRESENTANT LE TAUX DE DETECTION DE CHACUNE DES 17 PLACETTES OPE.

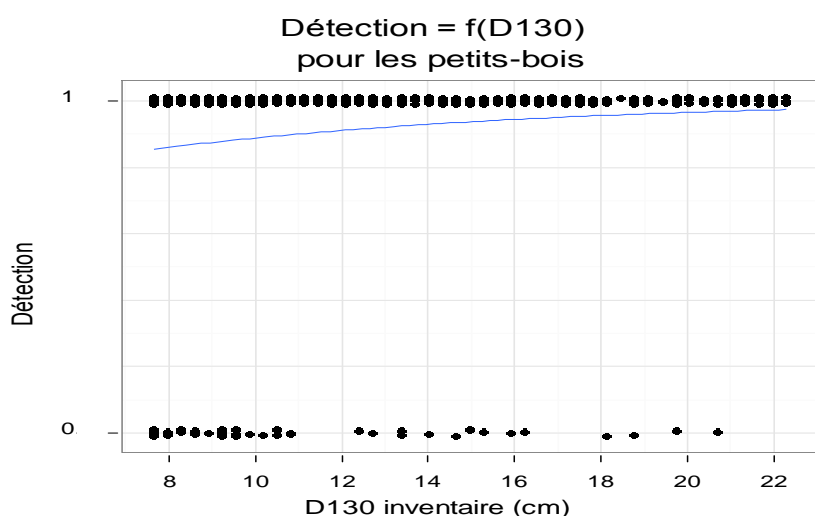
Le D130 des arbres est estimé avec un écart absolu moyen par rapport aux valeurs mesurées de 3,8 cm variant entre 0 et 58 cm. Cette variation se révèle être positivement corrélée au taux d'occlusion, à la distance et à la RMSE de la régression linéaire utilisée pour le calcul du D130. Ces trois variables, intégrées dans un même modèle linéaire restent significatives pour expliquer l'erreur de l'estimation (Table 2). Elles n'expliquent pas toute sa variabilité ($R^2=0,08$), mais elles renseignent quant à l'influence qu'elles ont sur l'estimation : leur variation positive fait augmenter l'erreur sur l'estimation. La distance a un effet fortement plus significatif lorsqu'elle est testée seule. Son effet doit alors déjà être en partie pris en compte par le taux d'occlusion. Le diamètre de l'arbre a le même effet mais il devient négligeable une fois intégré dans le modèle. Par ailleurs, un effet « placette » est certainement responsable des points extrêmes mais celui-ci n'a pas pu être mis en évidence car les hypothèses sur lesquelles repose le test ne sont pas vérifiées. A l'échelle des placettes, pour cet échantillon, il n'a pu être mis en évidence que l'effet du pourcentage de petits-bois : plus la proportion de petits diamètres dans la placette est grande, moins bonne est la RMSE.

TABLE 2 : TABLE DES VARIANCES DU MODELE EXPLIQUANT EXPLIQUANT LA VARIABILITE DE L'ECART DU D130 (CONDITION D'HOMOGENEITE DES RESIDUS VERIFIEE).

	Sum Sq	Df	F value	Pr(>F)
RMSE	840.91	1	25.05	0.0000
Taux d'occlusion	276.03	1	8.22	0.0043
Distance	190.79	1	5.68	0.0175
Residuals	17723.52	528		

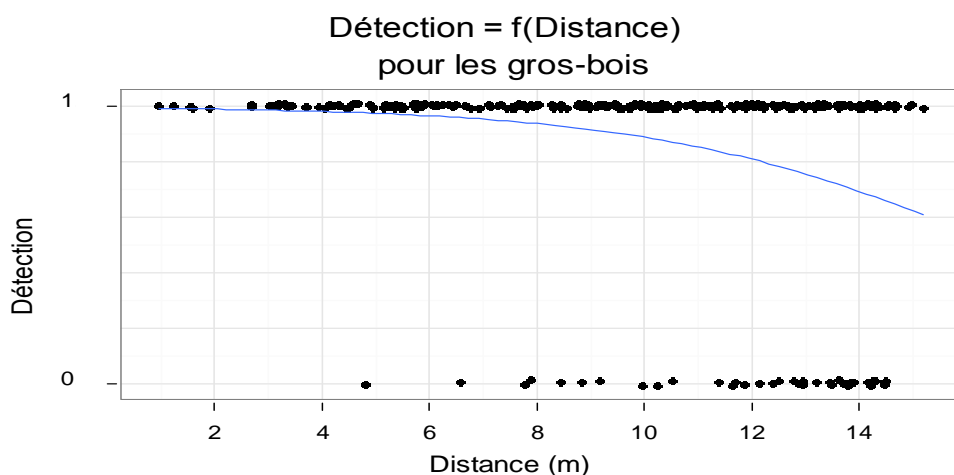
ii. IFN

L'analyse réalisée avec l'échantillon IFN, d'une plus grande variété de peuplements, révèle également de bons résultats concernant la détection. Sur les 1135 arbres inventoriés que compte cet échantillon, 91% ont été détectés. L'analyse explicative de cet échantillon s'est faite séparément sur chacune des 3 catégories de bois pour ne pas qu'il y ait un effet dû aux placettes concentriques (forte liaison entre les catégories de diamètres et la gamme de distances prospectée). Ainsi, alors que la détection des bois-moyens ne se révèle être influencée par aucune variable, la détection des petits-bois est défavorisée par les faibles diamètres (Graphique 7). Quant aux gros-bois, inventoriés de 0 à 15 m, ils ont une probabilité de détection nettement meilleure dans les 8 premiers mètres, selon le modèle logistique représenté par le graphique 8.



GRAPHIQUE 7 : REGRESSION LOGISTIQUE DE LA DETECTION DES PETITS-BOIS EN FONCTION DE LEUR DIAMETRE.

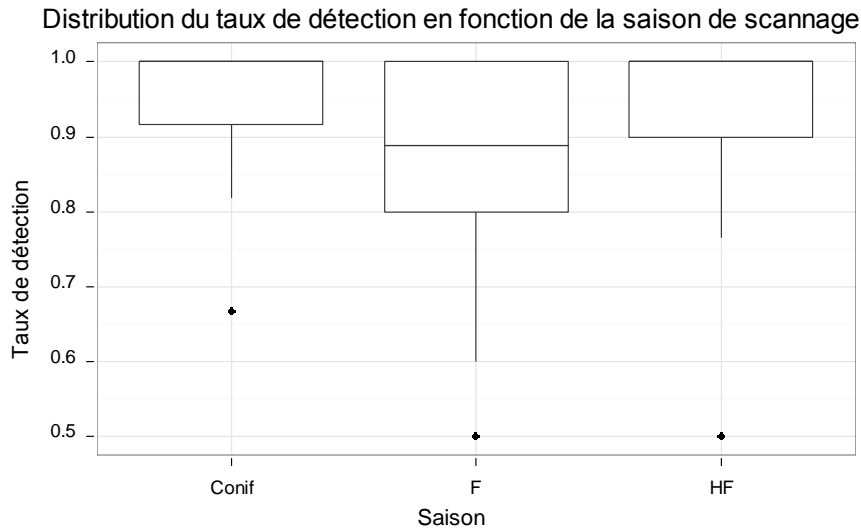
0 : arbre non détecté
1 : arbre détecté



GRAPHIQUE 8 : REGRESSION LOGISTIQUE DE LA DETECTION DES GROS-BOIS EN FONCTION DE LEUR DISTANCE

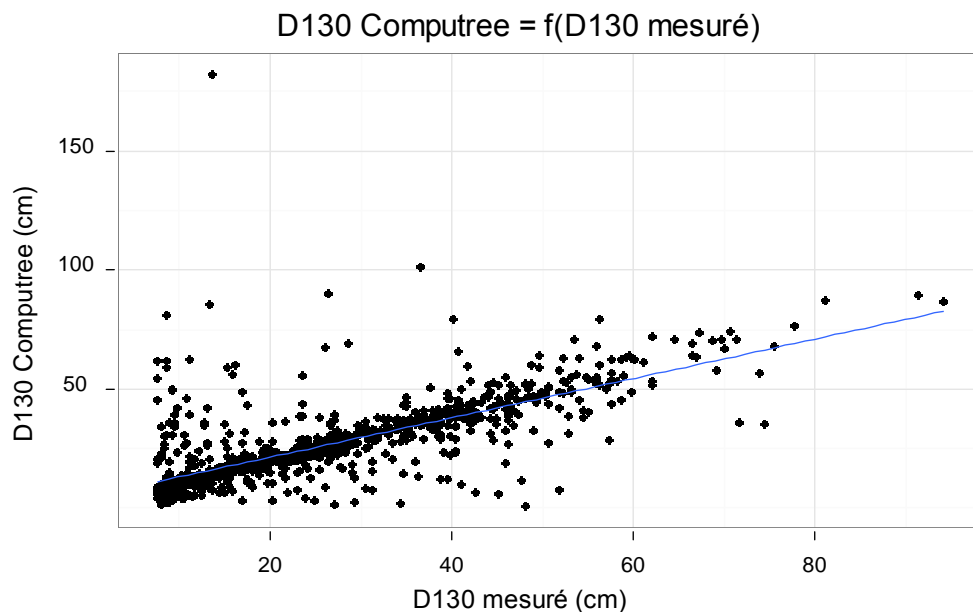
0 : arbre non détecté
1 : arbre détecté

A l'échelle de la placette, l'analyse a permis de mettre en relation le taux de détection avec le sous-étage et la période à laquelle a été effectué le scan. En effet, les placettes ont un taux de détection qui baisse avec l'augmentation de l'indice de sous-étage. Les placettes scannées en feuilles ont également un taux de détection plus bas que les placettes de conifères ou celles scannées hors-feuilles (Graphique 9).



GRAPHIQUE 9 : DISTRIBUTION DU TAUX DE DETECTION POUR LES PLACETTES IFN – LES PLACETTES SCANNEES EN PERIODE DE VEGETATION (F) ONT UNE DISTRIBUTION PLUS LARGES QUE LES PLACETTES SCANNEES EN HIVER(HF) OU CELLES DE CONIFERES.

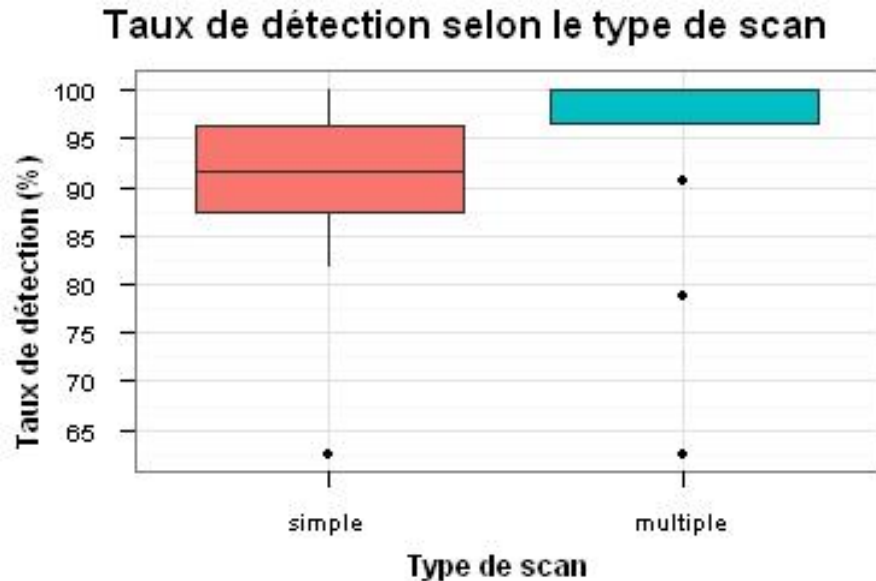
Les arbres de cet échantillon ont été estimés avec un écart moyen de 5,2 cm, dans un intervalle de 0,0 à 168,2 cm. L'arbre estimé avec un écart de 168,2 cm a été scanné en période de végétation. Les feuilles générant un grand nombre de points à proximité des arbres, les troncs sont difficilement distinguables. D'ailleurs les arbres scannés en période de végétation concernent une grande proportion des arbres estimés à plus de 10 cm par rapport à leur proportion dans l'échantillon. Beaucoup de petits-bois apparaissent ainsi surestimés (Graphique 10). Cette catégorie de diamètres présente une estimation significativement corrélée à la RMSE de la régression, tout comme les gros-bois. L'essence a tendance à influencer l'estimation des bois-moyens. Enfin, à l'échelle de la placette, la composition et l'indice de sous-étage expliquent la RMSE du D130 estimé. Les peuplements de résineux présentent une meilleure RMSE que les peuplements feuillus et mixtes. La saison a une tendance significative à augmenter la RMSE : les placettes scannées en feuilles ont tendance à avoir une estimation dégradée par rapport aux placettes scannées en hiver et celles de conifères.



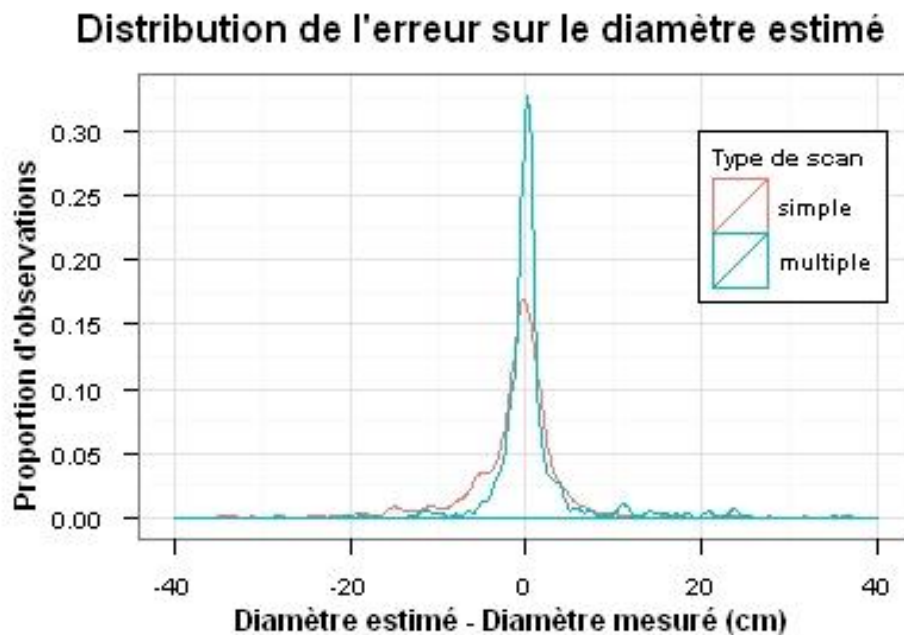
GRAPHIQUE 10 : D130 ESTIMES PAR COMPUTREE VERSUS D130 INVENTORIEES POUR LES ARBRES DE L'ECHANTILLON IFN.

3. LE MULTIPLE-SCAN

Le traitement des nuages fusionnés a conduit à un taux de détection amélioré de 3% en moyenne par placette, comparée au traitement des scans uniques (Graphique 11). Les enregistrements supplémentaires effectués à plusieurs mètres du centre se révèlent bénéfiques pour la détection des arbres peu ou pas visibles en bordure de placette. Le multiple-scan a également permis de diminuer considérablement l'erreur de l'estimation du D130 (Graphique 12). En effet, les arbres sont estimés avec un écart moyen de 3,8 cm en simple-scan et de 3,5 cm en multiple-scan. Il est toutefois à noter que le temps de traitement d'un nuage fusionné est d'environ 30 min, le traitement d'un nuage unique nécessite 3 fois moins de temps.



GRAPHIQUE 11 : DISTRIBUTION DES TAUX DE DETECTION DES 17 PLACETTES OPE POUR LE SIMPLE- ET LE MULTIPLE-SCAN.



GRAPHIQUE 12 : DISTRIBUTION DE L'ERREUR SUR LE DIAMETRE ESTIME POUR LES DEUX METHODES DE SCANNAGE.

V. DISCUSSION

Les analyses successives des 17 placettes OPE sous les 4 versions ont entraîné des modifications qui, pour cet échantillon, ont amélioré l'individualisation et la continuité des troncs. Par conséquent, la dernière version fournit un taux de détection amélioré de manière significative. Sa moyenne atteint plus de 90%, l'augmenter à nouveau paraît difficile. En effet, les arbres demeurant non détectés sont pour la majorité partiellement occultés par d'autres ou en bordure de placette où la visibilité est le plus atténuée par un éventuel sous-étage. Les arbres non détectés, bien que représentant une faible proportion, s'avèrent évidemment contraignants quant à la réalisation de l'inventaire d'une placette. Ceci l'est d'autant plus si toutes les catégories de bois sont concernées. Or, les gros diamètres n'ont pas une meilleure détection que les petits : un arbre en bordure de placette ou occulté, petit ou gros, a moins de chance d'être détecté. Le multiple scan permet de palier cela et améliore en effet la détection de ces arbres : cette méthode de scannage permet de détecter en moyenne 3% d'arbres supplémentaires par placette. Le traitement des placettes IFN a permis d'observer un nombre d'arbres deux fois plus élevé dans un contexte plus varié. Le taux de détection, pour cet échantillon, se révèle également satisfaisant avec une moyenne de 91% d'arbres détectés. L'analyse de ces données est cependant compliquée par l'inventaire par placette concentrique. Seule la détection des petits-bois est corrélée positivement avec le diamètre. Les diamètres sous le seuil de pré-comptabilité ont une probabilité de détection plus faible. Cette catégorie de bois n'étant inventoriée que dans un rayon de 6 m, l'effet de la distance est fatalement peu marqué. Celui-ci n'est révélé que pour les gros-bois, inventoriés jusqu'à 15 m : 80% des gros-bois non détectés se situent à plus de 10 m du centre. Par ailleurs, les placettes dont le taux de détection est le plus bas ont un indice de sous-étage plus élevé. Cet effet intègre celui de la saison de scannage : les feuilles génèrent du bruit qui s'ajoute à celui du sous-étage (régénération, branches). Les placettes scannées en période de végétation présentent ainsi un taux de détection significativement plus faible que celles scannées en hiver. Quant aux peuplements de conifères, ils présentent globalement un meilleur taux de détection. Bien que les aiguilles génèrent également du bruit dans le nuage de points, les peuplements de conifères dans ce jeu de données sont principalement des plantations. L'espacement des tiges et leur absence de branche basse sont favorables à une bonne détection.

L'estimation du D130 a également été améliorée au fil des versions. Les observations ont montré que les problèmes d'individualisation et de continuité des troncs influençaient largement la précision de l'estimation. Ainsi, les corrections effectuées en V1 et V2 ont contribué à réduire l'erreur. Ensuite, le calcul d'un défilement via une régression linéaire pour interpoler une valeur de diamètre à 1 m 30 a conduit à une nouvelle diminution de l'erreur globale. Il en est de même pour le passage en V4 qui permet de supprimer les cercles de diamètre trop aberrant par rapport aux autres. Néanmoins, ces diminutions ne se sont pas opérées sur tous les arbres pour chaque version successive. Certains arbres estimés correctement en V1, V2 ou V3, ne l'ont pas été en V4. En effet, le critère permettant de supprimer les cercles trop différents des autres peut agir contrairement au résultat attendu en ajustant la régression linéaire sur de mauvais cercles car plus nombreux entre 0 et 3m30. Ce point nécessite donc d'être approfondi via des observations supplémentaires pour optimiser ce critère qui semble tout de même pertinent compte tenu des améliorations globales. Par ailleurs, les caractéristiques des individus et des placettes influent sur l'estimation du D130 en dégradant l'information décrivant le tronc. Alors que le jeu de données OPE révèle que le taux d'occlusion et la distance de l'arbre dégradent significativement l'estimation de son diamètre, celui de l'IFN met en évidence l'effet de l'essence. Cet effet est confirmé par l'analyse des placettes : les peuplements mixtes et résineux ont une meilleure RMSE que les peuplements feuillus. Or, les scannages réalisés en période de végétation ont tendance à

diminuer la précision des estimations des placettes concernées et il en est de même pour celles dont l'indice de sous-étage est élevé. Comme la détection, l'estimation du diamètre apparaît sensible à l'occlusion des arbres. L'aspect algorithmique a également été mis en relation avec l'estimation du D130 et ce par les deux jeux de données. La RMSE de la régression linéaire sur laquelle repose l'estimation du D130 des arbres s'est révélée positivement corrélée avec l'imprécision de l'estimation. Cela confirme qu'une interpolation du D130 faite à partir de cercles correctement ajustés le long du tronc fournit une meilleure estimation tout comme une visibilité plus grande de l'arbre. L'échantillon OPE révèle d'ailleurs que la distance a tendance à faire augmenter la RMSE de la régression linéaire. L'effet positif du multiple-scan sur l'écart absolu des erreurs démontre le potentiel du logiciel quand l'occlusion devient faible.

L'occlusion des arbres apparaît comme le facteur le plus limitant quant à la détection et à l'estimation du D130 des tiges. Cette occlusion peut être provoquée par un sous-étage ou par des arbres générant une zone d'ombre. Or, la densité ou la surface terrière des peuplements n'ont pas d'effet marqué sur ces paramètres bien que ces caractéristiques puissent également être indicatrices d'une occlusion potentiellement importante au sein d'une placette. Il conviendrait donc d'évaluer plus précisément, à l'aide d'indicateurs fiables, l'effet occultant du sous-étage qui peut se révéler très impactant particulièrement quand la distance augmente. Le multiple-scan ou la réduction de la taille des placettes représentent des méthodes pouvant pallier l'occlusion quelle que soit son origine. Ainsi, d'un point de vue opérationnel, on pourrait soit proposer un protocole multi-scan (temps de mesure par placette augmenté), soit une réduction du rayon des placettes à 10-12 m (nécessité de faire plus de placettes).

VI. CONCLUSION

Cette étude a conduit à la progression du logiciel quant à la détection et à l'estimation du diamètre à 1 m 30. Si le premier paramètre est devenu très fiable, le second dont l'incertitude varie encore avec une trop grande amplitude doit faire l'objet d'observations et d'analyses afin de poursuivre son amélioration. L'accent doit être mis sur la réduction du nombre d'arbres extrêmement mal estimés et de leur écart avec les mesures de référence. Les résultats exposés dans cette étude sont, toutefois, prometteurs et confirment l'intérêt du LiDAR terrestre en gestion forestière. Les 127 placettes testées ont permis de mettre en évidence que l'occlusion jouait un rôle majeur dans la robustesse des résultats. Il conviendrait d'approfondir l'analyse quantitative des effets pour mieux diriger les travaux d'amélioration.

L'information fournie par cette technologie laser est considérablement riche et rend possible l'extraction de nombreux paramètres dendrométriques renseignant sur la quantité mais aussi sur la qualité du bois. Avec la reconnaissance de l'espèce, les estimations de volumes, de hauteurs et d'indicateurs de qualité représentent des objectifs qu'il est nécessaire d'atteindre pour répondre aux besoins et valider l'application du LiDAR terrestre aux méthodes d'inventaire.

BIBLIOGRAPHIE

- Aschoff T. and Spiecker H.** Algorithms for the automatic detection of trees in laser scanner data [Conference] / ed. Thies M. [et al.]. - 2004. - Vols. XXXVI-8/W2. - pp. 71-75.
- Aschoff T., Thies M. and Spiecker H.** Describing forest stands using terrestrial laser-scanning [Conference]. - [s.l.] : Citeseer, 2004. - Vol. XXXV. - pp. 237-241.
- Bienert A. [et al.]** Application of terrestrial laser scanners for the determination of forest inventory parameters [Conference] / ed. Maas H.-G. and Schneider D.. - 2006. - Vol. XXXVI.
- Bienert A. [et al.]** Tree detection and diameter estimations by analysis of forest terrestrial laserscanner point clouds [Conference] / ed. Rönnholm P., Hyypä H. and Hyypä J.. - 2007. - Vols. XXXVI-3/W52. - pp. 50-55.
- Bienert A., Maas H.G. and Scheller S.** Analysis of the information content of terrestrial laserscanner point clouds for the automatic determination of forest inventory parameters [Conference]. - 2006.
- Brolly G. and Kiraly G.** Algorithms for Stem Mapping by Means of Terrestrial Laser Scanning [Journal] // Scientific Committee. - 2009. - Vol. 5. - pp. 119-130.
- Côté J.F. [et al.]** The structural and radiative consistency of three-dimensional tree reconstructions from terrestrial lidar [Journal] // Remote Sensing of Environment. - [s.l.] : Elsevier, 2009. - 5 : Vol. 113. - pp. 1067-1081.
- Dassot M.** Estimate wood volumes using terrestrial LiDAR, the next challenge for forestry: a prospective approach [Conference]. - 2010. - LERMAB meeting.
- Dassot M., Constant T. and Fournier M.** The use of terrestrial LiDAR technology in forest science: application fields, benefits and challenges [Journal] // Annals of Forest Science. - 2011. - Vol. 68. - pp. 1-16.
- de Lafaye P., Drouilhet R. and Liquet B.** Le logiciel R [Book] / ed. Dodge Yadolah. - [s.l.] : Springer, 2011. - 1 : p. 490.
- der Van D. [et al.]** 3D upscaling of transpiration from leaf to tree using ground-based LiDAR: Application on a Mediterranean Holm oak (*Quercus ilex* L.) tree [Journal] // Agricultural and Forest Meteorology. - [s.l.] : Elsevier, 2009. - 10 : Vol. 149. - pp. 1573-1583.
- Haala N. [et al.]** Combination of terrestrial laser scanning with high resolution panoramic images for investigations in forest applications and tree species recognition [Conference] / ed. Maas H.G. and Schneider D.. - [s.l.] : Citeseer, 2004. - Vols. XXXIV-5/W16.
- Henning J.G. and Radtke P.J.** Detailed stem measurements of standing trees from ground-based scanning lidar [Journal] // Forest Science. - [s.l.] : Society of American Foresters, 2006. - 1 : Vol. 52. - pp. 67-80.
- Hopkinson C. [et al.]** Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar [Journal] // Canadian Journal of Forest Research. - [s.l.] : NRC Research Press, 2004. - 3 : Vol. 34. - pp. 573-583.
- Huang P. and Pretzsch H.** Using terrestrial laser scanner for estimating leaf areas of individual trees in a conifer forest [Journal] // Trees-Structure and Function. - [s.l.] : Springer, 2010. - Vol. 24. - pp. 609-619.
- Keane E.** The potential of terrestrial laser scanning technology in pre-harvest timber measurement operations [Report] / TreeMetrics. - 2007.
- Kiraly G. and Brolly G.** Tree height estimation methods for terrestrial laser scanning in a forest reserve [Conference] / ed. Rönnholm P., Hyypä H. and Hyypä J.. - 2007. - Vols. XXXVI-3/W52. - pp. 211-215.

- Liang X. [et al.]** Automatic stem location mapping using TLS for plot-wise forest inventory [Conference] / ed. Popescu S.C. [et al.]. - 2009. - Vols. Oct. 14-16, 2009.
- Liang X. [et al.]** Plot-level trunk detection and reconstruction using one-scan-mode terrestrial laser scanning data [Conference] // IEEE. - 2008. - pp. 1-5.
- Lim K. [et al.]** LiDAR remote sensing of forest structure [Journal] // Progress in Physical Geography. - [s.l.] : Sage Publications, 2003. - 1 : Vol. 27. - pp. 88-106.
- Maas H.G. [et al.]** Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data [Journal] // International Journal of Remote Sensing. - [s.l.] : Taylor and Francis, 2008. - 5 : Vol. 29. - pp. 1579-1593.
- Michel P. [et al.]** Assessing the ecological application of lasergrammetric techniques to measure fine-scale vegetation structure [Journal] // Ecological Informatics. - [s.l.] : Elsevier, 2008. - 4-5 : Vol. 3. - pp. 309-320.
- Moskal L.M. [et al.]** Lidar Applications in Precision Forestry [Conference] / ed. Popescu S.C. [et al.]. - 2009. - Vols. Oct. 14-16, 2009.
- ONF** Peuplements forestiers des plateaux calcaires de Lorraine - Typologies et sylvicultures [Report] / Office National des Forêts. - 2004.
- Pardé J. and Bouchon J.** Dendrométrie [Book] / ed. Nancy ENGREF. - [s.l.] : ENGREF Nancy, 1988.
- Pfeifer N. and Winterhalder D.** Modelling of tree cross sections from terrestrial laser scanning data with free-form curves [Conference] / ed. Thies M. [et al.]. - 2004. - Vols. XXXVI-8/W2. - pp. 76-81.
- Pfeifer N., Gorte B. and Winterhalder D.** Automatic reconstruction of single trees from terrestrial laser scanner data [Conference]. - [s.l.] : Citeseer, 2004. - Vol. XXXV. - pp. 114-119.
- Schutt C. [et al.]** Approaches for recognition of wood quality of standing trees based on terrestrial laserscanner data [Conference] / ed. Thies M. [et al.]. - 2004. - Vols. XXXVI-8/W2. - pp. 179-182.
- Simonse M. [et al.]** Automatic determination of forest inventory parameters using terrestrial laserscanning [Conference]. - 2003. - Vol. 2003. - pp. 252-258.
- Tansey K. [et al.]** Estimating tree and stand variables in a Corsican Pine woodland from terrestrial laser scanner data [Journal] // International Journal of Remote Sensing. - [s.l.] : Taylor & Francis, 2009. - 19 : Vol. 30. - pp. 5195-5209.
- Thies M. [et al.]** Three-dimensional reconstruction of stems for assessment of taper, sweep and lean based on laser scanning of standing trees [Journal] // Scandinavian Journal of Forest Research. - [s.l.] : Taylor & Francis, 2004. - 6 : Vol. 19. - pp. 571-581.
- Thies M. and Spiecker H.** Evaluation and future prospects of terrestrial laser scanning for standardized forest inventories [Conference] / ed. Thies M. [et al.]. - 2004. - Vols. XXXVI-8/W2. - pp. 192-197.
- Watt P.J. and Donoghue D.N.M.** Measuring forest structure with terrestrial laser scanning [Journal] // International Journal of Remote Sensing. - [s.l.] : Taylor & Francis, 2005. - 7 : Vol. 26. - pp. 1437-1446.
- Watt P.J., Donoghue D.N.M. and Dunford R.W.** Forest parameter extraction using terrestrial laser scanning [Conference]. - 2003. - Vol. 2003. - pp. 237-244.
- Wezyk P. [et al.]** Terrestrial laser scanning versus traditional forest inventory first results from the polish forests [Conference] / ed. Rönnholm P., Hyypä H. and Hyypä J.. - 2007. - Vols. XXXVI-3/W52. - pp. 424-429.

ANNEXE I - MESURES DU D130

Extrait du livre Dendrométrie, 1988 : la précision de cette mesure varie selon la méthode et la forme de la section. Un diamètre est mesuré avec une précision d'environ 2,5 cm.

22 MESURES DE LA GROSSEUR D'UNE SECTION

221 PRINCIPES

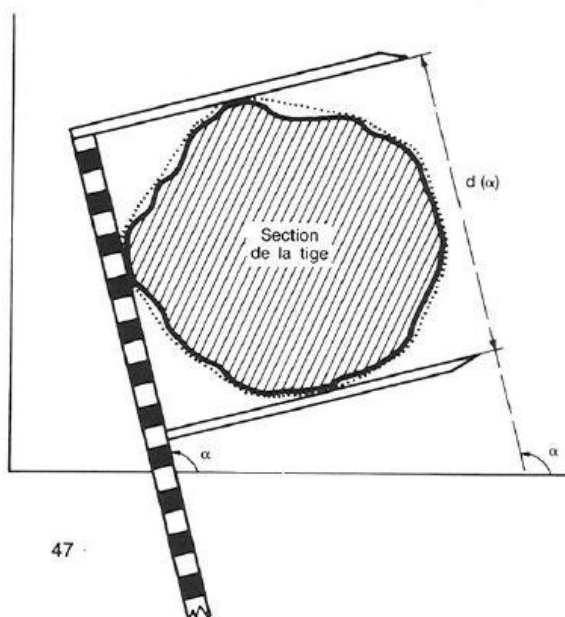
La section d'une tige à un niveau quelconque est l'intersection de cette tige avec un plan perpendiculaire à l'axe de la tige au niveau considéré.

La grosseur d'une section peut être estimée par le diamètre d , la circonférence c ou la surface g . Si la définition de g ne pose aucun problème, il n'en est pas de même pour c et d (voir figure 13).

La circonférence c sera la longueur de la plus petite courbe circonscrite au tracé de la section. Ainsi définie, on voit que le ruban donne une mesure exacte de la circonférence.

Figure 13 Circonférence, diamètre et section

La circonférence mesurée au ruban est figurée par la ligne pointillée entourant la section.



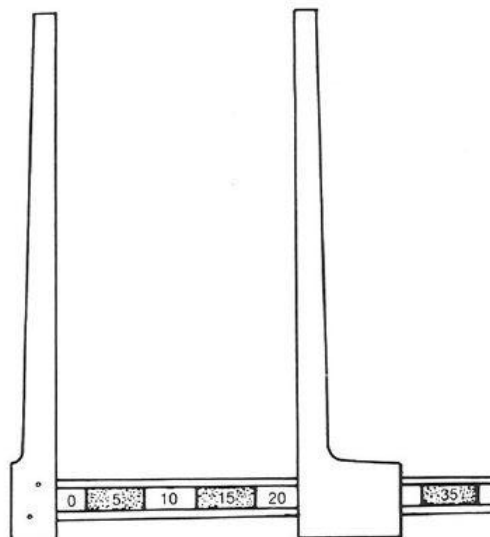
222.1 Diamètre d'un arbre. Compas

Le diamètre d'un arbre sur pied est mesuré à 1,30 m au-dessus du niveau du sol. La surface de la section à ce niveau est appelée surface terrière de l'arbre.

Le plus souvent, le diamètre est mesuré à l'aide du compas forestier à bras mobile⁽²⁾ (ou bastringue); en France, la graduation utilisée a un champ de 5 cm, ce qui signifie par exemple qu'un arbre de diamètre annoncé 35 cm a en réalité un diamètre compris entre 32,5 et 37,49 cm.

Le compas est dit compensé (figure 15) s'il est gradué directement en classes de diamètres; sa première classe (classe zéro) a alors une largeur d'une demi-graduation. Pour les petits arbres, on utilise des compas

Figure 15 Compas forestier « compensé »



(2) Anglais : caliper, allemand : kluppe, italien : cavaletto.

ANNEXE II - PROTOCOLE LIDAR IFN

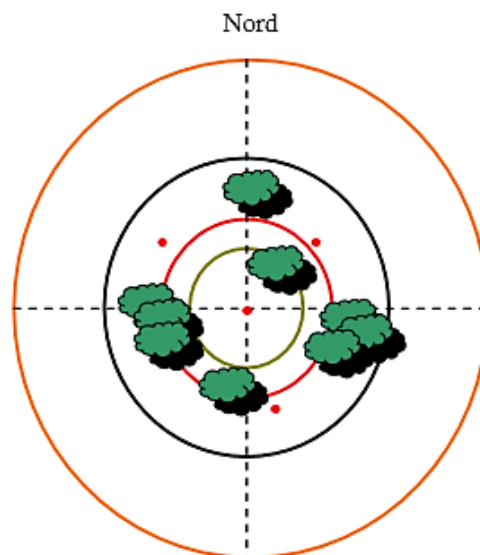
N.B. : l'orientation de départ du scannage n'est pas fixe, elle est à préciser sur le relevé terrain pour permettre de situer la placette par rapport aux points cardinaux. La configuration de l'appareil est la même que celle utilisée par l'OPE. (Source : *Données de terrain LiDAR 2010*)

DÉROULEMENT DE LA CAMPAGNE LIDAR MISE EN ŒUVRE TERRAIN

Positionnement des scanners

Les scans sont disposés en triangle dont les sommets sont choisis afin d'avoir une bonne couverture des arbres relevés sur toutes leurs faces. Le dernier scan est choisi en position centrale, la sphère de calage centrale bleue ne sera retirée qu'à ce moment là.

Le positionnement des trois scans périphériques n'est pas fixe et dépend de chaque situation. Généralement ils sont placés à une dizaine de mètres du centre de la placette. L'idéal est de pouvoir installer le laser dans un espace un peu plus dégagé telle qu'une trouée et ce pour éviter d'avoir un effet de masque trop important. Voir exemple ci-dessous.



Disposition des sphères de calage

On dispose pour chaque placette de cinq sphères de calage munies d'un pied télescopique. La sphère bleue est à placer au centre de la placette. Elle est visible à la fois sur les scans couleur et noir et blanc ce qui facilite le traitement. Les autres sphères sont à installer aléatoirement, de façon à ce qu'au moins trois sphères soient visibles par scan. Idéalement elles devraient toutes pouvoir être visibles.

Dans la mesure du possible il faut éviter les dispositions trop géométriques des sphères et essayer de les placer à des hauteurs différentes, soit en jouant sur la pente naturelle du terrain quand elle existe, soit avec le pied télescopique. Ceci permet notamment d'améliorer le calage des quatre scans d'une même placette.

Une fois disposées, les sphères ne doivent en aucun cas être bougées. Attention notamment au vent qui peut les faire bouger ou à ne pas les heurter lors des déplacements du laser d'une position à l'autre.

Manipulation du laser

Le laser terrestre est un outil particulièrement fragile. Il ne doit absolument pas sortir si les conditions climatiques sont mauvaises (pluie, neige, ...).

Sur le terrain, il est nécessaire de l'éteindre et le démonter pour le changer de position.

ANNEXE III – SCHÉMA HEURISTIQUE

La réalisation de l'étude a reposé sur la démarche analytique illustrée par le schéma ci-dessous.

