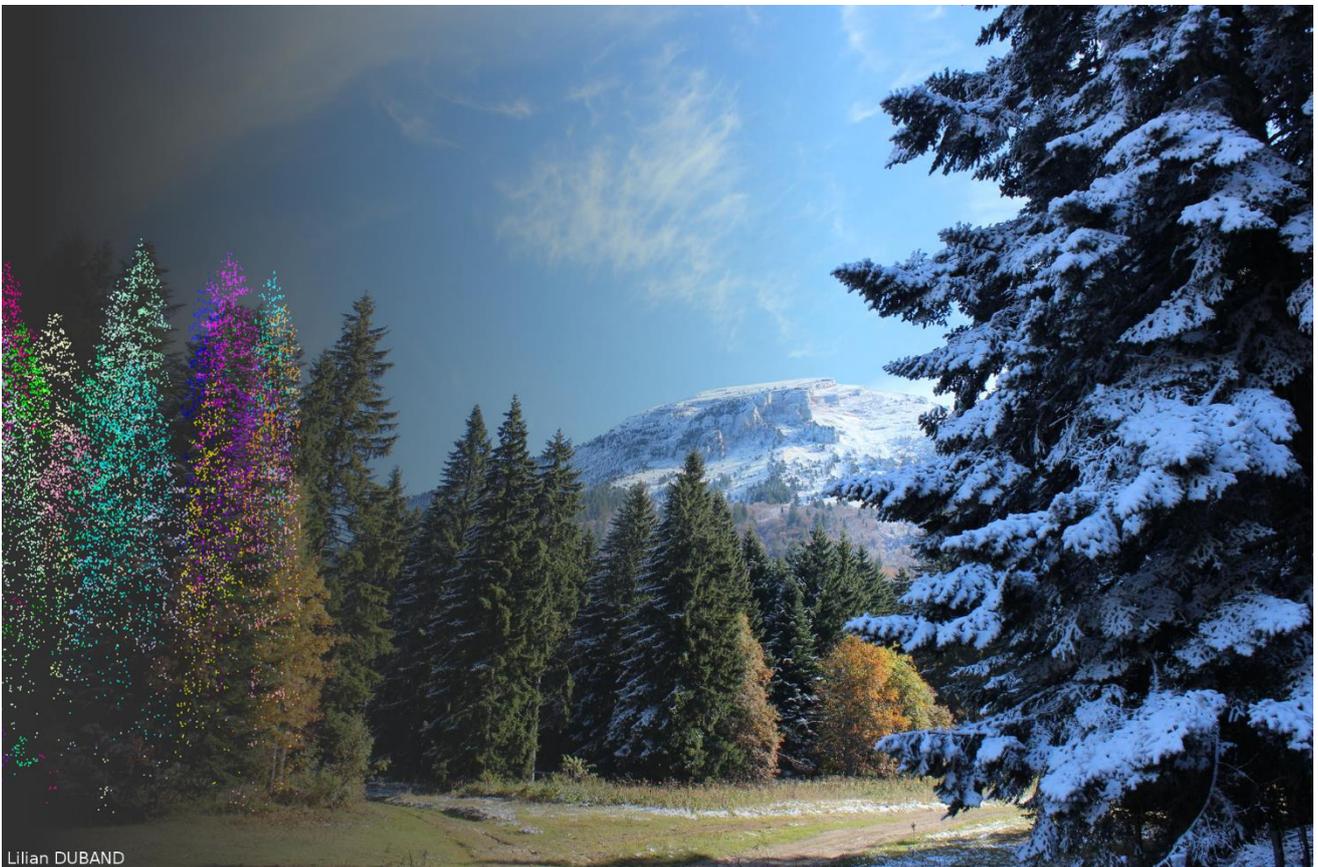


# Cartographie des arbres au LIDAR terrestre et aérien Méthodologie et application à la modélisation de peuplements de montagne



Mémoire de fin d'études  
Dominante d'approfondissement Gestion Forestière

**Illustration de couverture :**

Lisière de peuplement forestier en Isère (38)

Visualisation des données LIDAR : logiciel CompuTree ©ONF

Source de la photographie : Lilian DUBAND

Cartographie des arbres au LIDAR terrestre et aérien  
Méthodologie et application à la modélisation  
de peuplements de montagne

Mémoire de fin d'études  
Dominante d'approfondissement Gestion Forestière

## FICHE SIGNALÉTIQUE D'UN TRAVAIL D'ÉLÈVES

<b>AgroParisTech</b>	<b>TRAVAUX D'ÉLÈVES</b>
<b>TITRE :</b> Cartographie des arbres au LIDAR terrestre et aérien, méthodologie et application à la modélisation de peuplements de montagne	<b>Mots clés :</b> LIDAR aérien, LIDAR terrestre, inventaire LIDAR, télédétection, cartographie des arbres, peuplements de montagne, CompuTree, SAMSARA, SEGMA
<b>AUTEUR :</b> Lilian DUBAND	<b>Promotion :</b> 2015 - 2016
<b>Caractéristiques :</b> 1 Volume ; 107 Pages ; 26 Figures ; 20 Tableaux ; 13 Annexes ; bibliographie	

<b>CADRE DU TRAVAIL</b>		
<b>ORGANISME PILOTE OU CONTRACTANT :</b> Office National des Forêts – Pôle Recherche Développement et Innovation de Chambéry		
<b>Nom du responsable :</b> Jérôme BOCK		
<b>Fonction :</b> Chargé de recherche et développement		
<b>Nom du correspondant AgroParisTech :</b> Eric LACOMBE		
<input type="checkbox"/> Spécialité	<input type="checkbox"/> Stage 2A <input checked="" type="checkbox"/> Stage fin d'études  <b>Date de remise :</b> 04 / 10 / 2016	<input type="checkbox"/> Autre

<b>SUITE À DONNER (réservé au Service des Etudes)</b>
<input checked="" type="checkbox"/> Consultable et diffusable <input type="checkbox"/> Confidentiel de façon permanente <input type="checkbox"/> Confidentiel jusqu'au ...../...../..... , puis diffusable

# Engagement de non plagiat

## ① Principes

- Le plagiat se définit comme l'action d'un individu qui présente comme sien ce qu'il a pris à autrui.
- Le plagiat de tout ou parties de documents existants constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée
- Le plagiat concerne entre autres : des phrases, une partie d'un document, des données, des tableaux, des graphiques, des images et illustrations.
- Le plagiat se situe plus particulièrement à deux niveaux : Ne pas citer la provenance du texte que l'on utilise, ce qui revient à le faire passer pour sien de manière passive. Recopier quasi intégralement un texte ou une partie de texte, sans véritable contribution personnelle, même si la source est citée.

## ② Consignes

- Il est rappelé que la rédaction fait partie du travail de création d'un rapport ou d'un mémoire, en conséquence lorsque l'auteur s'appuie sur un document existant, il ne doit pas recopier les parties l'intéressant mais il doit les synthétiser, les rédiger à sa façon dans son propre texte.
- Vous devez systématiquement et correctement citer les sources des textes, parties de textes, images et autres informations reprises sur d'autres documents, trouvés sur quelque support que ce soit, papier ou numérique en particulier sur internet.
- Vous êtes autorisés à reprendre d'un autre document de très courts passages in extenso, mais à la stricte condition de les faire figurer entièrement entre guillemets et bien sûr d'en citer la source.

③ **Sanction** : En cas de manquement à ces consignes, la DEVE/le correcteur se réservent le droit d'exiger la réécriture du document sans préjuger d'éventuelles sanctions disciplinaires.

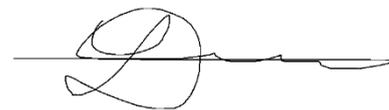
## ④ Engagement :

Je soussigné Lilian DUBAND

Reconnait avoir lu et m'engage à respecter les consignes de non plagiat

A Chambéry le 27 Août 2016

Signature :



Cet engagement de non plagiat doit être inséré en début de tous les rapports, dossiers, mémoires.

# Résumé

La localisation et la caractérisation de la ressource forestière sont des enjeux techniques pour la gestion durable des forêts. Les LIDAR, aérien et terrestre, se présentent comme des outils de plus en plus utilisés en foresterie, notamment pour la cartographie des arbres. L'objectif de ce stage est de mettre au point et d'évaluer plusieurs méthodes de cartographie dans des peuplements irréguliers et mélangés des Alpes du Nord. Trois sources de données sont comparées : le A-LIDAR, le T-LIDAR et une méthode topographique classique.

Un protocole d'inventaire au T-LIDAR a été mis au point pour cartographier des surfaces d'un hectare avec moins d'un centimètre de décalage. La détection des troncs est presque parfaite, l'espèce a été codée sur le terrain et détectée avec 1 % d'erreur. La prédiction du diamètre est moins précise avec une RMSE de 3,4 cm et un léger biais de surestimation. Ces résultats obtenus au T-LIDAR, sur des surfaces d'environ 1 ha, dans des contextes de fortes pentes, constituent une première et offrent des perspectives prometteuses aussi bien en recherche qu'en gestion forestière.

Ce stage a également été l'occasion de participer au co-développement d'un algorithme de détection de couronnes d'arbre : SEGMA. Différentes étapes ont été adaptées au cas des forêts alpines, pour obtenir un taux de détection global de 67 %, avec toutefois 20 % d'erreur de commission. Avec plus de 80 % des arbres dominants bien détectés, SEGMA se classe parmi les meilleurs algorithmes (Eysn et al., 2015). Les caractéristiques de distribution du nuage de points dans les couronnes des arbres détectés ont été valorisées pour prédire plusieurs paramètres forestiers : l'espèce avec 65 % de bonne classification, la hauteur des arbres avec 1,7 m de RMSE, et le diamètre des tiges avec une RMSE de 8,9 cm. Les trois cartographies ont finalement été comparées dans un modèle de dynamique des peuplements : SAMSARA.

# Abstract

Localization and characterization of forest resource in a technical issue for sustainable forest management. Aerial and terrestrial LIDAR are tools more and more used in forestry, especially for tree cartography. The aim of this internship is to assess several methods of cartography in mixed and irregular forest stands in northern Alps. Three data sources are compared: A-LIDAR, T-LIDAR and one usual topographic method.

A T-LIDAR inventory procedure has been developed in order to map areas of about 10 000 m<sup>2</sup> with a gap of less than 1 cm. The stem detection is almost perfect, the species have been coded on the field and detected with an error of 1 %. The diameter prediction is less precise with a RMSE of 3.4 cm, and a light overestimation bias. These results, obtained on surfaces of about 10 000 m<sup>2</sup> are the first ones in a context of important slopes, and offer promising prospects, as well in research as in forest management.

This internship was also the opportunity to participate to the co-development of a tree crown detection algorithm: SEGMA. Different steps were adapted to the context of Alps' forests, and the result is a global detection rate of 67 %, with 20 % of commission error. With more than 80 % of detected trees in the dominant trees, SEGMA ranks among the best detection algorithms (Eysn et al., 2015). Point characteristics and distribution in the point cloud of detected tree crowns were used to predict several tree parameters: species with 65 % of correct classification, height with a RMSE of 1.7 m and diameter with a RMSE of 8.9 cm. The three cartographies were finally compared in a forest dynamics model: SAMSARA.

## Remerciements

Ce stage a été enrichissant pour moi en grande partie grâce aux personnes que j'ai eu la chance de rencontrer. Je tiens à les remercier ici pour leur implication dans mon stage et leurs conseils :

Jérôme Bock, mon maître de stage, pour sa participation active aux différentes étapes du stage et pour les discussions constructives qui ont permis de faire avancer le projet.

Eric Lacombe, mon enseignant tuteur, pour son appui dans ce stage et ses recommandations.

Alain Munoz, pour son aide sur la partie statistique et pour les discussions en général.

Catherine Riond, pour son aide et son accueil dans son service.

Laurent Malabeux, pour les discussions au bureau et l'aide pour le matériel.

Alexandre Piboule, pour son aide précieuse et les nombreuses heures passées à développer des algorithmes dans *CompuTree* pour que je puisse avancer dans mon stage.

Myriam Legay, Anne Joly, Jean-Pierre Renaud et Nicolas Gomez pour leur accueil sur le site de Nancy et leur regard extérieur sur mon stage.

Jean-Matthieu Monnet pour sa disponibilité et son aide sur les modèles SAMSARA et Rockyfor3D.

Eric Mermin, Pascal Tardif, Sophie L'Huillier, Sébastien Laguet, Sophie Labonne, Emmanuel Poncelet et Lucas pour leur aide précieuse lors des inventaires de terrain, dans des conditions difficiles.

Benoît Courbaud et Guillaume Laguarrigue pour leurs travaux sur SAMSARA qui l'ont rendu utilisable dans le cadre précis de mon stage.

Benoît St-Onge pour son aide sur la compréhension et l'adaptation de l'algorithme SEGMA au contexte alpin.

## Table des matières

Remerciements .....	1
Table des figures.....	5
Table des tableaux .....	6
Index des abréviations .....	7
Introduction .....	8
1 - Eléments de contexte et organisation du projet.....	9
1.1 - Télédétection par LIDAR.....	9
1.1.1 - Fonctionnement des technologies LIDAR utilisées en forêt.....	9
1.1.2 - Les différents types de T-LIDAR.....	9
1.1.3 - Les différents types de A-LIDAR .....	9
1.2 - Méthodes de caractérisation des arbres en peuplement et intérêt.....	10
1.2.1 - Intérêts de la détection individuelle des arbres.....	10
1.2.2 - Méthodes de traitement de données issues du A-LIDAR .....	11
1.2.3 - Méthodes de traitement de données issues du T-LIDAR.....	15
1.2.4 - Contexte de l'étude.....	17
1.2.5 - Contraintes pour l'obtention de données au LIDAR en montagne .....	17
2 - Méthodologie .....	18
2.1 - Choix des sites d'étude et des échantillons de travail .....	18
2.1.1 - Données A-LIDAR .....	18
2.1.2 - Choix des sites en fonction de la commande .....	19
2.1.3 - Echantillons utilisés pour l'analyse de la détection des houppiers dans le A-LIDAR.....	20
2.1.4 – Echantillons de l'analyse des modèles de prédiction de l'espèce, de la hauteur et du diamètre .	21
2.2 - Cartographie des arbres au T-LIDAR .....	21
2.2.1 - Protocole de mesure en forêt.....	21
2.2.2 - Recalage des différents scans en une zone cohérente .....	24
2.2.3 - Détection de la position et du diamètre .....	25
2.2.4 – Détection du code espèce .....	26
2.3 – Cartographie des arbres au A-LIDAR .....	26
2.3.1 - Segmentation des houppiers dans le nuage de points.....	27
2.3.2 - Modélisation de l'espèce en fonction de la forme du houppier.....	28
2.3.3 - Modélisation de la hauteur réelle en fonction de la hauteur LIDAR et de la pente locale.....	30
2.3.4 - Modélisation du diamètre.....	30
2.4 - Modélisation des peuplements à partir des cartographies et comparaison.....	30

2.4.1 - Recalage des différentes cartographies .....	30
2.4.2 - Comparaison des trois cartographies des arbres.....	31
2.4.4 – Cartographie sur de grandes surfaces : application de SEGMA sur un massif .....	32
3 - Analyse des résultats .....	32
3.1 - Analyse descriptive des différents échantillons utilisés .....	32
3.2 - Analyse des temps pour chaque méthode.....	33
3.2.1 - Analyse des temps d’inventaire sur les trois sites choisis .....	33
3.2.2 - Analyse détaillée des temps pour le site de Vaujany .....	33
3.3 – Détection et caractérisation des tiges au A-LIDAR .....	35
3.3.1 - Résultats de la segmentation et tests de l’algorithme SEGMA.....	35
3.3.2 - Résultats de la modélisation de l’espèce .....	39
3.3.3 - Résultats de la modélisation de la hauteur .....	42
3.3.4 - Résultats de la modélisation du diamètre .....	43
3.4 - Comparaison entre les 3 méthodes de cartographie .....	45
3.4.1 - Appariement des arbres entre les 3 cartographies .....	45
3.4.2 - Comparaison globale des 3 cartographies .....	47
3.4.3 - Comparaison quantitative des cartographies manuelle et T-LIDAR .....	47
3.4.4 - Comparaison quantitative des cartographies manuelle et A-LIDAR.....	48
3.4.5 - Comparaison générale des 3 modèles .....	51
3.5 - Résultats de la comparaison après simulations dans SAMSARA.....	52
3.6 - Résultats de l’application de SEGMA sur de grandes surfaces .....	53
4 – Discussion des résultats .....	53
4.1 - Comparaison des différentes méthodes de cartographie .....	53
4.1.1 – Comparaison des temps de mise en œuvre .....	53
4.1.2 – Erreur de position planimétrique et appariement des cartographies.....	53
4.2 - Discussion des résultats de la cartographie des arbres au T-LIDAR .....	54
4.2.1 – Résultats sur l’espèce et le diamètre .....	54
4.2.2 - Perspectives d’amélioration de la méthode.....	54
4.2.3 - Perspectives d’utilisation de la cartographie par T-LIDAR .....	56
4.3 - Discussion des résultats de la cartographie des arbres au A-LIDAR.....	56
4.3.1 - Segmentation des houppiers.....	56
4.3.2 - Modèle de prédiction de l’espèce.....	58
4.3.3 - Modèle de prédiction de la hauteur .....	58
4.3.4 - Modèle de prédiction du diamètre.....	58
4.3.5 - Perspectives d’utilisation de la méthode .....	59

Conclusion.....	60
Bibliographie .....	62
Liste des contacts.....	65
Annexes .....	66
Annexe 1 : fiche technique du scanner FARO Focus 3D.....	67
Annexe 2 : Protocole T-LIDAR utilisé en Décembre 2015 par l’ONF .....	69
Annexe 3 : Notice opérationnelle d’utilisation du scanner FARO® Focus 3D.....	70
Annexe 4 : Résultats des tests de visibilité des sphères en polystyrène .....	77
Annexe 5 : Résultats du test de repositionnement des sphères sur des rondelles métalliques.....	78
Annexe 6 : protocole de scan T-LIDAR développé et appliqué aux 3 sites d’étude .....	79
Annexe 7 : Détail des étapes de CompuTree pour la détermination du diamètre et de la position .....	84
Annexe 8 : Script R utilisé pour la reconnaissance automatique des espèces .....	85
Annexe 9 : Notice opérationnelle de traitement de l’espèce des arbres au T-LIDAR.....	89
Annexe 10 : Détail des étapes de SEGMA dans <i>CompuTree</i> .....	97
Annexe 11 : Détail des métriques utilisées dans les modèles.....	99
Annexe 12 : Valeurs des coefficients du modèle de prédiction de la hauteur (2) .....	101
Annexe 13 : Valeurs des coefficients du modèle allométrique de prédiction du diamètre (3).....	101

## Table des figures

Figure 1 : Différents types de mesures au A-LIDAR (Bedjanec, 2011).....	9
Figure 2 : Carte de situation des trois sites d'étude (Source : Géoportail) .....	19
Figure 3 : Erreurs de calage entre deux scans lors de l'inventaire réalisé par l'ONF à la Motte Servolex en Décembre 2015.....	22
Figure 4 : Schéma de mise en application du protocole : trajectoire est sphères de calage.....	23
Figure 5 : Schéma des 8 motifs utilisés pour différencier les espèces à partir de sphères en polystyrène .....	24
Figure 6 : Sphères détectées dans un nuage T-LIDAR avec le logiciel FARO® Scene .....	25
Figure 7 : Type de détection des arbres par SEGMA en fonction de leur diamètre sur l'échantillon de calibration.....	36
Figure 8 : Impacts du raster utilisé dans SEGMA sur le taux de détection et l'erreur de comission de la segmentation (box plot).....	37
Figure 9 : Impacts de la méthode de remplissage des cavités utilisée dans SEGMA sur le taux de détection et l'erreur de comission de la segmentation (box plot) .....	37
Figure 10 : Impacts du filtrage sur l'aire des couronnes dans SEGMA sur le taux de détection et l'erreur de comission de la segmentation .....	38
Figure 11 : Comparaison de SEGMA avec l'algorithme de référence de l'IRSTEA : taux de détection et erreur de comission.....	38
Figure 12 : Importance explicative selon random forest pour les 10 variables sélectionnées par la procédure VSURF.....	40
Figure 13 : coefficients du modèle logistique polytomique de prédiction de l'espèce sur l'échantillon de calibration.....	41
Figure 14 : Résultats du modèle de prédiction de la hauteur sur l'échantillon de calibration .....	42
Figure 15 : résultats de la prédiction du diamètre avec le modèle allométrique sur l'échantillon de calibration .....	44
Figure 16 : valeurs des coefficients du modèle linéaire de prédiction du diamètre sur l'échantillon de calibration.....	44
Figure 17 : Résultats de la prédiction du diamètre avec le modèle linéaire additif sur l'échantillon de calibration.....	45
Figure 18 : Représentation graphique des 3 méthodes de cartographie sur le site de Vaujany .....	46
Figure 19 : Ecarts de distance entre les positions des cartographies manuelle et T-LIDAR en fonction de la distance au point de référence des cartographies.....	47
Figure 20 : Comparaison des diamètres mesurés manuellement et au T-LIDAR avec représentation des arbres fourchus et méplat.....	48
Figure 21 : Ecarts de distance entre les positions des cartographies manuelle et A-LIDAR en fonction de la distance au point de référence des cartographies.....	48
Figure 22 : Comparaison des hauteurs mesurées manuellement ou par A-LIDAR sur le site de Vaujany .....	49
Figure 23 : Comparaison des diamètres mesurés manuellement et au A-LIDAR sur le site de Vaujany .....	50
Figure 24 : Histogramme du nombre d'arbre par espèce et par classe de diamètre selon les 3 méthodes de cartographie sur le site de Vaujany.....	51
Figure 25 : Histogrammes du nombre d'arbre par espèce et par classe de diamètre selon les 3 méthodes de cartographie sur le site de Vaujany après 50 et 100 ans de simulation .....	52
Figure 26 : Arbres visible au T-LIDAR et au A-LIDAR sur le site de Vaujany.....	56

## Table des tableaux

Tableau 1 : Taux d'appariement et erreurs de comission pour 6 algorithmes de détection des houppiers testés dans le massif alpin (Eysn et al., 2015) .....	13
Tableau 2 : Synthèse bibliographie des erreurs de détection de l'espèce à l'échelle de l'arbre dans le nuage A-LIDAR.....	14
Tableau 3 : Synthèse bibliographique des erreurs de prédiction du diamètreà l'échelle de l'arbre à partir du nuage A-LIDAR .....	15
Tableau 4 : Synthèse bibliographique sur les surfaces des placettes inventoriées au T-LIDAR.....	16
Tableau 5 : Description du peuplement, de la topographie et des données A-LIDAR pour les 3 sites d'étude .....	20
Tableau 6 : Description des vols A-LIDAR utilisés pour réaliser les échantillons de calibration et de validation.....	20
Tableau 7 : Tensions de calage des scans en fonction du type de sphère utilisé .....	23
Tableau 8 : Description des principaux paramètres dendrométriques des jeux de calibration et de validation utilisés dans cette étude .....	32
Tableau 9 : détail des temps d'inventaire manuel et T-LIDAR pour les 3 sites d'étude.....	33
Tableau 10 : Détail du temps consacré aux différentes étapes du processus de cartographie au T-LIDAR ...	34
Tableau 11 : Détail du temps consacré aux différentes étapes du processus de cartographie au A-LIDAR ...	34
Tableau 12 : Synthèse des temps d'inventaire et de traitement pour les 3 méthodes de cartographie sur le site de Vaujany.....	35
Tableau 13 : Synthèse des résultats de détection des houppiers de l'algorithme SEGMA sur l'échantillon de calibration.....	35
Tableau 14 : Synthèse des résultats de détection des houppiers de l'algorithme SEGMA sur l'échantillon de validation à l'échelle de l'arbre .....	39
Tableau 15 : Détail des raisons de la non-détection des arbres par SEGMA sur l'échantillon de validation à l'échelle de l'arbre.....	39
Tableau 16 : Matrice de confusion de la prédiction de l'espèce avec le modèle random forest sur l'échantillon de calibration .....	40
Tableau 17 : Matrice de confusion de la prédiction de l'espèce avec le modèle logistique polytomique sur l'échantillon de calibration.....	41
Tableau 18 : Synthèse du nombre d'arbres détecté total et hors cas limites et morts pour les 3 méthodes de cartographie sur le site de Vaujany.....	47
Tableau 19 : matrice de confusion de la prédiction de l'espèce au A-LIDAR sur le site de Vaujany .....	50
Tableau 20 : ventilation de la surface terrière par espèce pour les 3 méthodes de cartographie sur le site de Vaujany .....	51

## **Index des abréviations**

2D - deux dimensions

3D - trois dimensions

AFD - analyse factorielle discriminante

GNSS - global navigation satellite system

IRSTEA - institut de recherche scientifique et technique sur l'environnement et l'agriculture

kNN - k nearest neighbor : k voisins les plus proches

kMSN - k most similar neighbor : k voisins les plus similaires

LASER - *light amplification by stimulated emission of radiation*

LIDAR - *light detection and ranging*

A-LIDAR - LIDAR aérien

T-LIDAR - LIDAR terrestre

MNH - modèle numérique de hauteur

MNS - modèle numérique de surface

MNT - modèle numérique de terrain

ONF - office national des forêts

RF - random forest : arbre aléatoire

RMSE - root mean square error : erreur quadratique moyenne

### **Définition des catégories de grosseur :**

Référence : guide de sylviculture des Alpes du Nord (Gauquelin et al., 2006)

PB : petits bois ( $17,5 < \text{diamètre} < 27,5$  cm)

BM : bois moyens ( $27,5 < \text{diamètre} < 42,5$  cm)

GB : gros bois ( $42,5 < \text{diamètre} < 62,5$  cm)

TGB : très gros bois ( $62,5 < \text{diamètre}$ )

## Introduction

La cartographie précise des arbres et l'estimation de leurs caractéristiques dendrométriques offre de nouvelles possibilités pour mettre en œuvre la gestion durable des forêts. En effet, il existe de plus en plus de modèles de croissance et de dynamique des peuplements dépendants des distances, pour lesquels la position et la concurrence entre les arbres sont prises en compte (Houllier et al., 1991). De plus, une cartographie précise de la ressource peut permettre, au niveau de la gestion, de mieux cibler les zones de récolte, en particulier dans le cas de coupes réalisées par câble dans les zones de montagne difficiles d'accès et sous exploitées (Colin 2016). Cette sous exploitation présente également un risque majeur pour les gestionnaires notamment en termes de stabilité et de renouvellement des peuplements. Une cartographie détaillée peut enfin permettre de localiser les arbres de gros diamètre dans l'objectif de créer des zones de libre évolution.

Dans les Alpes du Nord le modèle SAMSARA (Courbaud et al., 2015), dépendant des distances et développé par l'IRSTEA, permet de prédire la dynamique des peuplements dans ce contexte. L'IRSTEA a également développé un autre modèle qui permet d'évaluer le rôle de protection des forêts vis-à-vis des chutes de blocs : Rockyfor3D (Dorren, 2016). Tous ces outils nécessitent une cartographie précise des arbres qui peut être réalisée sur le terrain par des mesures fastidieuses ou bien être simulée à l'aide de processus stochastiques, plus ou moins précis par rapport à la réalité de terrain. L'analyse de la sensibilité des modèles à ces paramètres n'a que très peu été faite à ce jour.

Depuis une vingtaine d'années, la technologie LIDAR aérien ou A-LIDAR (*aerial light detection and ranging*) est de plus en plus utilisée dans le cadre de la gestion pour cartographier les principaux paramètres dendrométriques à l'échelle du massif forestier (Næsset, 2004). Avec la démocratisation de la technologie, le LIDAR terrestre (T-LIDAR) apparaît également comme un outil permettant d'inventorier les peuplements de façon précise, du moins à l'échelle d'une placette d'inventaire (Bauwens et al., 2016; Dassot et al., 2011), mais a rarement été utilisé sur de grandes surfaces. L'augmentation de la précision des mesures et de la capacité de traitement des données permet maintenant d'avoir des images très précises des arbres en trois dimensions, et ouvre la porte à une analyse précise de différents paramètres forestiers, aussi bien à l'échelle du peuplement qu'à l'échelle de l'arbre.

L'objectif de ce stage est de mettre au point et de comparer différentes méthodes de cartographie et de caractérisation des arbres dans les peuplements escarpés des Alpes du Nord. Pour cela, trois sources de données sont comparées : l'acquisition classique à l'aide d'un inventaire manuel sur le terrain, l'inventaire par T-LIDAR et par A-LIDAR. Cette cartographie concerne les principaux paramètres dendrométriques forestiers : position, espèce, diamètre et hauteur des arbres. Après avoir réalisé un état de l'art des connaissances dans ce domaine, une méthodologie complète de la chaîne de traitement, depuis l'acquisition des données jusqu'à l'utilisation de cette cartographie par différents modèles est développée.

La démarche choisie pour l'élaboration de ces deux chaînes de traitement de données, T-LIDAR et A-LIDAR est la suivante. Tout d'abord un travail de documentation sur les différentes techniques et les différents algorithmes déjà développés permet de choisir les méthodes qui vont ensuite être utilisées. L'adaptation de ces différentes méthodes au contexte de l'étude et le développement de nouveaux outils permettent d'aboutir à une cartographie des arbres pour ces deux sources de données. Les résultats des différentes étapes sont ensuite exposés et comparés à d'autres résultats de cartographie. Pour finir les améliorations envisagées de ces deux chaînes de traitement ainsi que leurs possibilités d'utilisation sont discutées.

# 1 - Eléments de contexte et organisation du projet

## 1.1 - Télédétection par LIDAR

### 1.1.1 - Fonctionnement des technologies LIDAR utilisées en forêt

Le LIDAR (*light detection and ranging*) est une méthode de télédétection active qui utilise une impulsion LASER (*light amplification by stimulated emission of radiation*) pour caractériser des objets. Le principe du LIDAR est de mesurer le temps que met un rayon lumineux émis pour revenir à sa source. Connaissant la vitesse de propagation de ce rayon et la position précise de l'émetteur, il est alors possible de calculer la distance à laquelle se trouve l'objet ainsi que ses coordonnées. Le résultat d'un scan LIDAR est un nuage de points en trois dimensions (Bonnet et al., 2013).

Ces scanners peuvent être embarqués dans des vecteurs aériens (avion, hélicoptère, drone, ...), on parle alors de LIDAR aérien ou A-LIDAR.

Lorsque le scanner est posé au sol on parle de LIDAR terrestre ou T-LIDAR.

### 1.1.2 - Les différents types de T-LIDAR

Le T-LIDAR génère des nuages de points 3D à partir d'un capteur au sol.

Il existe deux types de scanners T-LIDAR selon s'ils utilisent le temps de retour de l'onde (*time of flight scanners*), ou bien le décalage de phase de l'onde (*phase-shift scanners*) (Dassot et al., 2011).

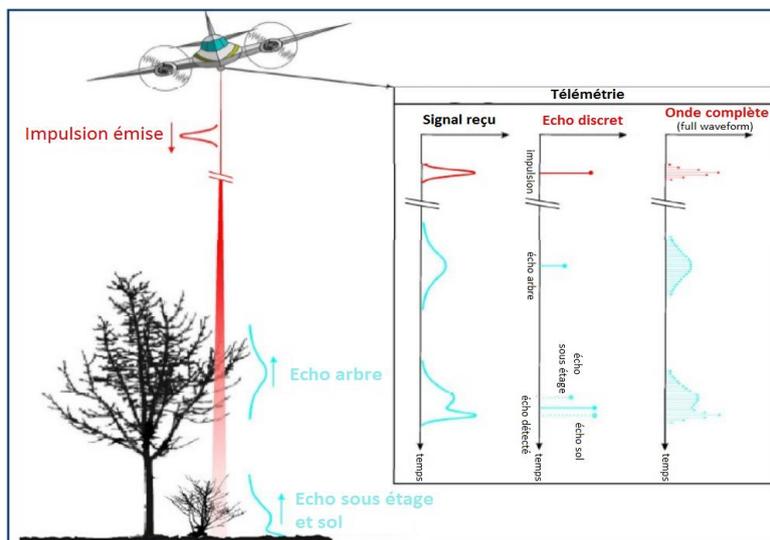
L'utilisation du décalage de phase de l'onde permet des mesures plus rapides mais moins précises en milieu forestier, et sur une moins grande distance (généralement inférieure à 100 m) (Dassot et al., 2011).

### 1.1.3 - Les différents types de A-LIDAR

Le A-LIDAR permet de caractériser des zones étendues grâce à un survol en altitude (entre 500 et 3 000 m) (White et al., 2014). Etant donné la distance entre le scanner et les objets scannés, seuls les scanners basés sur le temps de retour de l'onde sont utilisés.

Les scanners peuvent enregistrer différents niveaux d'informations. Certains scanners enregistrent les différents échos de manière discrète (différents échos végétation et sol) alors que d'autres modèles enregistrent l'onde de retour complète (full waveform) (Figure 1) (Bednjanec, 2011; Mallet et al., 2007).

Figure 1 : Différents types de mesures au A-LIDAR (Bedjanec, 2011)



Dans les deux cas le résultat du survol LIDAR est une succession de retours d'onde traitée pour obtenir nuage de points en trois dimensions (3D). La position de l'appareil permet de repositionner ce nuage de points dans un référentiel cartographique absolu (par exemple *lambert 93* en France). Des algorithmes permettent ensuite de classifier le nuage de points, classiquement en points sols et sur-sol. En forêt les points sur-sol correspondent le plus souvent à la végétation et la distribution de ces points est fortement liée à la composition et à la structure des peuplements (Næsset, 2004; White et al., 2014). Grâce à l'analyse de la distribution des points LIDAR, les forestiers peuvent alors calibrer des modèles de prédiction de variables dendrométriques et caractériser les peuplements.

## **1.2 - Méthodes de caractérisation des arbres en peuplement et intérêt**

### **1.2.1 - Intérêts de la détection individuelle des arbres**

Pour différents usages forestiers, il est important de connaître le positionnement individuel des arbres. Que ce soit du point de vue écologique ou économique, la localisation des arbres de diamètre important dans les peuplements permet de mieux orienter la gestion durable d'un massif. Il est ainsi possible de trouver un compromis entre la mise en place d'îlots de sénescence et la récolte des bois matures. En montagne, le logiciel Sylvaccess (Dupire et al., 2015), utilise notamment la localisation de la ressource en gros bois pour optimiser l'installation de lignes de câble et rendre ainsi rentable l'exploitation dans les zones difficiles d'accès.

Au niveau recherche, la cartographie des arbres est souvent utilisée car elle permet d'étudier finement la croissance des arbres en peuplements, en tenant compte des phénomènes de compétition individuelle et d'interaction avec la lumière (Houllier et al., 1991). Le modèle de dynamique des peuplements SAMSARA (Courbaud et al., 2015) est un exemple de mise en œuvre de ces interactions dans le contexte des peuplements mélangés de sapin, épicéa et hêtre en montage.

La cartographie des arbres en montagne est également utilisée pour simuler le rôle de protection des forêts dans le cadre d'une analyse des risques de chute de blocs avec le modèle Rockyfor3D (Dorren, 2016). Les arbres sont pris en compte comme des obstacles sur la trajectoire des blocs. Lorsqu'un bloc rencontre un arbre il change de direction et dissipe une partie de son énergie.

Il faut savoir que pour toutes ces applications, la cartographie des arbres dans les peuplements forestiers est une opération longue et fastidieuse. Elle utilise des moyens topographiques classiques : boussole, télémètre, théodolite (Monnet et al., 2015). De plus l'emploi d'un GPS en milieu forestier n'est pas une solution satisfaisante pour la cartographie des arbres puisque les erreurs de positionnement sont de l'ordre de quelques mètres du fait des interférences dues aux troncs et aux houppiers (Munoz, 2014).

**Un des enjeux de ce stage est d'étudier différentes méthodes qui permettraient de cartographier et de caractériser automatiquement les arbres en forêt, d'appréhender leur précision et leur rendement afin de réaliser une comparaison avec la méthode manuelle classique.**

Deux applications de la cartographie des arbres en zone de montagne sont détaillées dans les paragraphes suivants.

### ***1.2.1 - Simulation de l'évolution de peuplements mélangés en zone de montagne avec SAMSARA***

SAMSARA est un modèle de croissance dépendant des distances ayant pour objectif de prédire l'impact de stratégies de gestion forestière pour les peuplements résineux (sapin, épicéa) ou mélangés (sapin, épicéa, hêtre) en montagne. La croissance est modulée pour chaque arbre en fonction de la quantité de lumière interceptée par son houppier (Courbaud et al., 2015).

Une cartographie des arbres est nécessaire en donnée d'entrée (coordonnées de chacune des tiges). Pour chaque arbre dépassant un diamètre minimal fixé, le diamètre et l'espèce doivent être renseignés. La hauteur totale de l'arbre et la hauteur de la base du houppier peuvent être issues de mesures ou bien prédites par allométrie. Les caractéristiques de la régénération (c'est à dire tous les arbres ayant un diamètre inférieur au seuil fixé), peuvent être renseignées par un comptage terrain sur des cellules carrées de 5 m de côté ou bien prédites de manière stochastique en fonction des conditions d'éclairement.

La simulation se déroule par pas de 3 ans. A chaque étape il est possible de réaliser une opération sylvicole ou bien de laisser le peuplement en libre évolution.

SAMSARA produit des données dendrométriques à l'échelle de l'arbre : diamètre, hauteur, surface terrière par exemple, et ceci tout au long de la simulation. Il est également possible d'obtenir ces paramètres à l'échelle de la zone considérée ou ramenés à l'hectare.

### **1.2.2 - Méthodes de traitement de données issues du A-LIDAR**

#### ***1.2.2.1 - L'inventaire forestier au A-LIDAR***

L'inventaire forestier par A-LIDAR s'est démocratisé au début du 21<sup>e</sup> siècle, surtout dans les forêts d'Amérique du Nord et du Nord de l'Europe. Le LIDAR a pu prouver son intérêt pour caractériser avec précision des grandes surfaces forestières (Næsset, 2004). En France, dans des peuplements plus hétérogènes et mélangés, les travaux entrepris à l'ONF et en partenariat avec d'autres organismes de recherche depuis plus de cinq ans, montrent qu'il est possible d'estimer et de cartographier les caractéristiques dendrométriques des peuplements forestiers avec une précision satisfaisante pour faciliter l'élaboration des aménagements forestiers, voire les enrichir (Munoz et al., 2016).

Il existe actuellement deux approches pour caractériser les peuplements à partir du nuage de points A-LIDAR (Maltamo et al., 2014).

L'approche surfacique travaille sur la répartition des points dans le nuage à l'échelle de cellules (par exemple des cercles de 15 m de rayon). Le principe consiste à calibrer le modèle à partir de données dendrométriques relevées sur le terrain par rapport à des variables explicatives statistiques calculées sur le nuage de points. Ces variables sont calculées sur l'emprise exacte des placettes qui doivent donc être très précisément localisées. Après avoir été validé, le modèle est appliqué sur l'ensemble de la zone, aboutissant à une cartographie exhaustive de la grandeur dendrométrique.

Dans le contexte de forêts de montagne, l'erreur de prédiction pour la hauteur dominante est inférieure à 5 % soit d'environ 1 m. Cette valeur correspond à l'erreur constatée lors d'une mesure au sol sur des dispositifs de recherche (Brassel, 2001). Pour la surface terrière ou le diamètre, l'erreur est de l'ordre de 15 à 20 % à l'échelle de la cellule, ce qui est au moins équivalent à la plupart des résultats relascopiques. A l'échelle de la parcelle l'erreur diminue et est équivalente à celle d'un inventaire en plein (Munoz et al., 2016). En revanche pour la densité, les résultats ne sont pas satisfaisants pour le moment et la position des arbres n'est pas détectée.

Pour la majorité des variables dendrométriques, les modèles sont empiriques et nécessitent une calibration avec des placettes de terrain pour chaque contexte forestier.

L'approche individuelle consiste à détecter puis à délimiter des arbres dans le nuage de points ou à partir d'images rasters qui en sont issues (modèle numérique de hauteur ou de surface (MNH ou MNS)). Les caractéristiques de la couronne segmentée et les informations du nuage de points correspondant à chaque arbre sont ensuite utilisées pour prédire différents paramètres dendrométriques comme la hauteur, l'espèce ou le diamètre. Cette méthode se rapproche d'une méthode classique d'inventaire car les informations sont récoltées à l'échelle de l'arbre et peuvent ensuite être agrégées à différentes échelles : placette, unité de gestion ou peuplement.

L'approche individuelle a pour intérêt de fournir pour chaque arbre les coordonnées du maximum local de la couronne, considéré comme la position de l'arbre. Cependant les taux de détection varient entre 40 et 93% (Eysn et al., 2015; Kaartinen et al., 2012; Vega et al., 2014). Il existe des problèmes de sous détection (les houppiers de deux arbres sont fusionnés en une seule couronne) et de sur détection (le houppier d'un unique arbre est séparé en plusieurs couronnes). Cela crée une erreur pour la prédiction des caractéristiques à l'échelle de l'arbre mais aussi lors de l'agrégation des données à l'échelle du peuplement.

La prédiction du diamètre à l'échelle de l'arbre est le plus souvent réalisée grâce à des modèles statistiques qui dépendent fortement de facteurs tels que la sylviculture passée et présente, la station et l'essence (Maltamo et al., 2014).

A noter également le développement récent d'approches mixtes qui montrent l'apport significatif de variables issues de l'approche individuelle des modèles de prédiction de paramètres forestiers à l'échelle de la placette (Munoz et al., 2016).

#### ***1.2.2.2 - Différents algorithmes de segmentation des houppiers pour l'approche arbre par arbre***

Il existe différentes familles d'algorithmes utilisées pour identifier les houppiers. Ces derniers se basent soit sur la segmentation d'images 2D issues du nuage de point (Leckie et al., 2005) ; soit sur une approche directement sur le nuage de points en 3D (Morsdorf et al., 2004; Vega et al., 2014). La méthode par classification de points présente l'avantage de valoriser, sans la déformer, l'ensemble de l'information contenue dans le nuage de points. Elle est cependant plus difficile à mettre en œuvre sur une grande surface du fait de la quantité de données à traiter.

Etant donné qu'un des objectifs du stage est de pouvoir à terme travailler à l'échelle d'un massif, et donc sur de grandes surfaces, les outils utilisés dans le cadre de ce stage appartiennent à la famille de segmentation à partir d'images 2D. Seule cette méthode sera abordée dans la suite de l'exposé. Les approches de clusterisation dans le nuage de points sont décrites dans les études suivantes (Morsdorf et al., 2004; Vega et al., 2014).

Différents rasters peuvent être produits à partir du nuage de points LIDAR :

- le modèle numérique de terrain (MNT), qui modélise le sol ;
- le modèle numérique de surface (MNS), qui modélise la surface du peuplement c'est-à-dire la canopée ;
- le modèle numérique de hauteur (MNH), qui résulte de la soustraction du MNT au MNS.

La création du MNH peut aboutir à une déformation du houppier dans les zones de forte pente (Vega et al., 2014). Pour éviter ce biais il est possible de réaliser d'autres normalisations ou de travailler directement sur le MNS.

Le schéma général de ces méthodes est le suivant (Koch et al., 2006 ; Maltamo et al., 2014) :

- création des rasters ;
- filtrage des rasters ;
- détection des maxima locaux sur les rasters filtrés ;
- délimitation des enveloppes de couronnes en remplissant le raster renversé à partir des maxima (bassins versants) ;
- découpage et filtrage des couronnes en fonction d'indicateurs de forme.

Il est difficile de comparer les taux de détection entre les études car elles sont souvent réalisées dans des conditions forestières différentes et avec un matériel différent.

Une étude intéressante permet de faire le point sur les performances de différents types d'algorithmes de détection de couronne dans le contexte des forêts du massif alpin (Eysn et al., 2015). Les taux d'appariement ou « bonnes détections » (proportion des arbres mesurés ayant une correspondance avec une couronne LIDAR) varient de 43 à 49% selon les méthodes (Tableau 1). Les erreurs de comission ou « fausses détections » (proportion de couronnes LIDAR n'ayant pas de correspondance avec un arbre mesuré), varient de 9 à 61 % (Eysn et al., 2015).

Tableau 1 : Taux d'appariement et erreurs de comission pour 6 algorithmes de détection des houppiers testés dans le massif alpin (Eysn et al., 2015)

Méthode	Appariement (%)	Comission (%)	Appariement H : 15-20 m (%)	Appariement H > 20 m (%)
Maxima locaux du MNH filtrés	45	9	35	72
Graines de maxima sur le MNH puis croissance locale	43	20	30	72
Maxima locaux sur différents MNH	46	61	46	68
Bassins versants dans le MNH	49	49	36	76
Fenêtre glissante dans le MNH	41	16	24	66
Ajustements de polygones et bassins versants sur le MNH	44	13	40	73

Les taux de détection dépendent de la hauteur des arbres. Chacune des méthodes présentées gagne entre 22 et 42% de détection en passant de la classe des arbres hauts d'entre 15 et 20 m à ceux de plus de 20 m de haut.

Les taux de détection dépendent également de la composition. Ainsi le taux de détection est deux fois meilleur dans des résineux aux houppiers structurés que dans un couvert uniforme de feuillus (Koch et al., 2006).

La densité de points a également un impact sur le taux de détection. Les études mentionnent une densité minimale de 4 pts/m<sup>2</sup> pour réaliser des rasters à fine résolution et permettre ainsi une bonne détection des houppiers (White et al., 2014). Cependant d'autres auteurs montrent que l'augmentation de 2 à 8 pts/m<sup>2</sup> n'a qu'un effet marginal sur les performances de détection des algorithmes (Kaartinen et al., 2012).

### 1.2.2.3 - Prédiction de l'espèce à partir du nuage de points LIDAR du houppier

La prédiction de l'espèce nécessite l'utilisation d'indicateurs ou métriques, calculés sur le nuage de points LIDAR du houppier et qui permettent de réaliser des modèles statistiques. Il est également possible de combiner différentes sources de données par exemple LIDAR et photographie aérienne (Leckie et al., 2003).

Différents types de métriques sont utilisés, ils synthétisent des données sur :

- la pénétration du rayon dans le houppier (Liang et al., 2007) ;
- l'intensité et le spectre reçu par l'émetteur (Grün et al., 2007; Kim, 2007; Korpela et al., 2009) ;
- l'approximation du houppier par des volumes ou des formes en 3D (Vauhkonen et al., 2010) (Jauvart, 2013) ;
- l'approximation du houppier en 2D, soit par tranches horizontales (Vauhkonen et al., 2010), soit en étudiant le profil vertical des points (Barilotti et al., 2009).

L'intensité est fréquemment utilisée mais elle nécessite au préalable un travail de calibration car elle varie selon le type de scanner, les conditions de vol et les propriétés de la cible impactée (Heidemann, 2012). Des essais de calibration ont été réalisés mais les dispositifs restent lourds à mettre en œuvre (Ahokas et al., 2013). Etant donné que ces dispositifs de calibration n'ont pas été installés sur les sites étudiés, l'intensité n'est pas retenue comme variable explicative dans la suite de cette étude.

Plusieurs méthodes statistiques sont ensuite utilisées pour discriminer les espèces selon les valeurs de ces métriques (Tableau 2). Ces méthodes sont aussi bien paramétriques : régression logistique (Waser et al., 2009) ou analyse factorielle discriminante (AFD) (Jauvart, 2013) ; que non paramétriques : k voisins les plus proches (k nearest neighbor : kNN) (Korpela et al., 2009), k voisins les plus semblables (k most similar neighbor : kMSN) (Vauhkonen et al., 2010) ou arbres aléatoires (random forest : RF) (Vauhkonen et al., 2010).

Tableau 2 : Synthèse bibliographie des erreurs de détection de l'espèce à l'échelle de l'arbre dans le nuage A-LIDAR

Peuplement	Taux d'erreur	Méthode	Référence
PSY-EPC-FEU	Total = 24 %	kMSN	Vauhkonen et al., 2010
PSY-EPC-FEU	PSY = 35 % EPC = 31 % FEU = 15 %	RF	Vauhkonen et al., 2010
SAP-EPC	SAP = 18% EPC = 16%	AFD	Jauvart, 2013
PSY-EPC-BOU	PSY = 11% EPC = 22% BOU = 28%	kNN	Korpela et al., 2009
EPC-SAP-HET	SAP = 25% EPC = 18% HET = 22%	Régression logistique	Waser et al., 2009

PSY : Pin sylvestre, BOU : bouleau, EPC : épicéa, SAP : sapin, HET : hêtre, FEU : feuillus divers

#### 1.2.2.4 - Prédiction du diamètre à partir du nuage de points LIDAR du houppier

La relation liant la hauteur et le diamètre de l'arbre a été largement étudiée en recherche forestière, notamment par le biais de modèles allométriques (Deleuze et al., 1996; Dhôte et al., 1994). La principale difficulté de la méthode réside dans le fait que pour une hauteur donnée il existe une forte variabilité individuelle du diamètre. Cette variabilité est due entre autres à l'effet de la station, de la sylviculture passée et présente, du statut de l'arbre dans le peuplement, ...

La plupart des études prédisant le diamètre à l'échelle de l'arbre utilisent des modèles de régression linéaire se basant sur la hauteur LIDAR de l'apex et sur la surface des couronnes détectées (Heurich et al., 2004, Persson et al. 2002, Hyypä et al., 1999) (Tableau 3). D'autres études se concentrent sur la forme du houppier avec par exemple un découpage du houppier en tranches pour ensuite calculer des indicateurs (Vauhkonen et al., 2010).

Tableau 3 : Synthèse bibliographique des erreurs de prédiction du diamètre à l'échelle de l'arbre à partir du nuage A-LIDAR

Peuplement	RMSE Dbh (cm)	Méthode	Référence
SAP-EPC-HET irrégulier - subalpin	De 6,45 à 6,89	Régression linéaire $Dbh = f(H, H^2, CR, CR^2)$	(Heurich et al., 2004)
-	3,8	Régression linéaire $Dbh = f(H, CR)$	(Persson et al., 2002)
PSY-EPC-FEU	De 2,5 à 6,3	Random Forest	Vauhkonen et al., 2010

Abréviations : Dbh = diamètre à 1,3 m, CR = rayon de la couronne, H = hauteur mesurée au A-LIDAR

Globalement, quel que soit le peuplement considéré, les tiges dominées de petit diamètre sont mal détectées par A-LIDAR (Eysn et al., 2015). Une solution pour corriger ce biais à l'échelle de la placette ou du peuplement est de prédire la distribution des petits diamètres à partir d'un modèle calibré sur des zones où un inventaire exhaustif des arbres a été réalisé. La distribution des diamètres est le plus souvent modélisée à partir d'une loi de Weibull (Penner et al., 2015; Thomas et al., 2008).

#### 1.2.3 - Méthodes de traitement de données issues du T-LIDAR

Le T-LIDAR s'est fortement développé à partir des années 2000 suite à l'apparition de nouveaux scanners plus faciles à manipuler et moins onéreux (Dassot et al., 2011). Les scans au T-LIDAR permettent de prédire différents paramètres forestiers tels que le diamètre des arbres, leur espèce, la structure de l'arbre, la qualité, des indices foliaires, ... (Dassot et al., 2011).

Pour obtenir une image en 3D d'un arbre sur la totalité de son tronc, il est nécessaire de réaliser plusieurs scans pour avoir plusieurs angles de vue. Ces scans sont ensuite recalés entre eux afin d'obtenir un seul nuage de points 3D à partir d'objets servant de référence (classiquement des sphères). Il existe également des scanners mobiles qui scannent en continu la zone pendant que l'opérateur se déplace. Dans ce cas il n'y a alors plus besoin de placer des sphères, l'appariement se fait par rapport à des références naturelles (Bauwens et al., 2016).

Dans le cas le plus courant de scanners fixes, le plan de positionnement du scanner joue un rôle important afin de limiter au maximum les occlusions (zones non visibles depuis le scanner) (Van der Zande et al., 2006). En effet, en forêt, les occlusions sont nombreuses : tous les objets situés derrière un tronc depuis le scanner ne seront pas vus. Il faut alors prévoir une autre position de scan pour voir cette zone et également l'autre côté du tronc.

La distance aux objets est également importante à considérer lors de la réflexion sur le plan de positionnement du scanner. Plus un objet est proche du scanner, mieux il est décrit (Van der Zande et al., 2006), et donc plus les scans sont éloignés les uns des autres, plus la précision de la description des objets est variable à l'intérieur d'une même zone.

La qualité des scans est également fortement dépendante des conditions météorologiques : le vent crée des zones de flou lorsqu'il fait bouger les branches et une seule goutte de pluie sur le miroir du scanner peut dévier le rayon laser et fausser la totalité du scan (Dassot et al., 2011).

Les zones inventoriées au T-LIDAR dans ces études sont généralement de petite taille du fait de la difficulté de recalage des scans et de la quantité de données (Tableau 4).

Tableau 4 : Synthèse bibliographique sur les surfaces des placettes inventoriées au T-LIDAR

Surface (m <sup>2</sup> )	Nombre de scan	Surface par scan (m <sup>2</sup> )	Référence
1 225	12	100	(Hopkinson et al., 2004)
500	4	125	(Wezyk et al., 2007)
700	5	140	(Bauwens et al., 2016)

Dans le cadre de mon stage j'ai également eu accès aux résultats d'un essai d'inventaire au T-LIDAR sur environ 1 ha réalisé par l'ONF en Décembre 2015.

L'un des intérêts du T-LIDAR est d'avoir une mesure du diamètre et un positionnement relatif des arbres précis. Ces mesures nécessitent de positionner un cercle à 1,3 m sur le tronc de l'arbre dans le nuage de points. Cette opération peut être effectuée avec des transformations de Hough (Simonse et al, 2003), avec un écart type de 3,6 cm sur la position et de 2,8 cm sur le diamètre ; ou bien en utilisant la méthode des moindres carrés (Bienert et al., 2007), avec des écarts-type allant de 0,7 cm à 3,9 cm sur le diamètre selon les algorithmes de filtrage du tronc. En effet pour prédire le diamètre le filtrage du tronc est un élément déterminant (Bienert et al., 2007).

L'espèce des arbres peut être prédite à partir d'un scan au T-LIDAR même si relativement peu d'études traitent de ce sujet. Différentes approches sur l'écorce, multirésolution ou morphologique ont été testées pour discriminer hêtre, charme, chêne, pin, épicéa et merisier avec entre 93 et 100% de bonnes détections selon la méthode et l'espèce (Othmani, 2014). Cependant ces résultats ne sont pour l'instant valables que pour des espèces ayant des motifs d'écorce tranchés, et n'est donc pas généralisable dans les peuplements de montagne du fait de la ressemblance entre les écorces du sapin et de l'épicéa (Othmani, 2014). Dans le même esprit une évaluation de la qualité des troncs est possible en comparant sa surface à un cylindre pour déceler des défauts de forme (Schütt et al., 2004).

Le T-LIDAR peut également être utilisé pour réaliser des MNT précis (Simonse et al, 2003), qui pourraient avoir des applications pour caractériser la rugosité du sol dans le cadre de simulations de chute de blocs dans des peuplements forestiers.

**Tout au long de mon stage, j'ai utilisé la plateforme *CompuTree* <sup>®</sup>ONF (projet collaboratif porté par l'ONF) qui m'a permis de réaliser les traitements et de faire fonctionner l'algorithme de segmentation sur les nuages de points LIDAR. Cette plateforme permet d'agencer différentes étapes relativement simples en une chaîne de traitement complète et précise (Othmani et al., 2011). La plateforme est accessible à l'adresse suivante : <http://computree.onf.fr>.**

#### 1.2.4 - Contexte de l'étude

Cette étude s'intéresse aux forêts alpines à structure irrégulière et en mélange d'espèces résineuses : sapin (*Abies alba* (Mill.)), abrégé SAP, épicéa (*Picea abies* (L.)), abrégé EPC et feuillues : hêtre (*fagus sylvatica* (L.)), abrégé HET. Les autres feuillus, lorsqu'ils sont présents, sont regroupés avec le hêtre dans un groupe « feuillus », abrégé FEU.

Ces peuplements sont complexes à modéliser du fait de la pente et de la variabilité des structures et des espèces. Cependant ils représentent un fort enjeu pour la télédétection puisque le A-LIDAR peut apporter des informations sur des zones difficiles d'accès en raison des fortes pentes.

De plus ces peuplements présentent un intérêt par rapport à la cartographie individuelle des arbres. En effet que ce soit pour la dynamique du peuplement avec SAMSARA ou bien les chutes de blocs avec Rockyfor3D, les modèles caractérisant ces peuplements sont dépendants des distances et demandent une information à l'échelle de l'arbre.

Une cartographie précise permettrait également de caractériser les arbres de gros diamètre, soit pour optimiser la récolte de bois, soit pour mettre en place des peuplements en libre évolution, soit encore pour cerner les zones vieilles pour des questions de renouvellement et de stabilité dans des forêts à fort enjeu de protection.

#### 1.2.5 - Contraintes pour l'obtention de données au LIDAR en montagne

La prise de données A-LIDAR est complexe. Elle nécessite du matériel extrêmement coûteux et la mobilisation d'un avion ou d'un hélicoptère. Elle est donc généralement réalisée par des entreprises spécialisées.

L'acquisition A-LIDAR en zone de montagne est soumise à de nombreuses contraintes. Le relief rend bien évidemment le plan de vol plus complexe. La neige est également un problème car elle masque le sol en hiver. Les acquisitions se font donc en montagne pendant la période de végétation.

La prise de données T-LIDAR est également complexe en zone de montagnes du fait des fortes pentes qui rendent la prise de données complexe voire dangereuse pour les hommes et le matériel.

Les objectifs du stage, mis en relation avec cet état de l'art des méthodes et des résultats existants, permettent de dégager les principales questions scientifiques de ce stage.

**Question 1 : Est-il possible de réaliser un inventaire multi-scan au T-LIDAR dans des conditions difficiles de fortes pentes dans des forêts à fort enjeu de protection ? Si les résultats de cet inventaire sont satisfaisants, une carte avec la localisation exhaustive des arbres ainsi que leur espèce et leur diamètre est-elle réalisable ?**

**Question 2 : L'approche de détection des couronnes des arbres à partir du A-LIDAR, développée principalement pour les forêts nordiques, est-elle applicable aux peuplements mélangés et irréguliers de montagne ? Quelles seraient les modifications à mettre en œuvre pour adapter cette méthode à ce contexte et est-il possible de quantifier les erreurs ?**

**Question 3 : Quelles sont les erreurs de détection et de prédiction des caractéristiques des arbres telles que la position, l'espèce, le diamètre et la hauteur lorsque l'on compare une méthode d'inventaire A-LIDAR ou T-LIDAR avec une campagne classique d'inventaire de terrain manuelle. Quels sont les apports et les difficultés de mise en œuvre de ces différentes méthodes de cartographie ?**

**Questions 4 :** Quels sont les impacts sur les résultats de SAMSARA lorsque les cartographies réalisées par T-LIDAR ou A-LIDAR sont utilisées en entrée, en comparaison avec la cartographie manuelle de terrain ?

**Question 5 :** La technologie A-LIDAR permet-elle de changer d'échelle et de produire une cartographie à l'échelle d'un massif ?

## 2 - Méthodologie

L'étude porte sur une comparaison de différentes méthodes de cartographie et de caractérisation des peuplements forestiers en zone de montagne.

Pour cela, deux méthodes de caractérisation des peuplements par télédétection sont étudiées et comparées en termes de précision par rapport à une méthode de référence qui consiste en un relevé topographique classique des arbres sur une parcelle. La première utilise des données T-LIDAR, alors que la deuxième se base sur des données A-LIDAR. Les résultats fournis par ces deux méthodes sont, pour chaque arbre détecté : la position, l'espèce, le diamètre, et la hauteur. L'évaluation des erreurs de détection et de prédiction de ces paramètres forestiers sont également proposés dans cette étude.

L'étude porte dans une première partie sur la réflexion méthodologique sur l'inventaire et le traitement des données au T-LIDAR. La possibilité de réaliser un inventaire au T-LIDAR sur des surfaces de l'ordre d'un hectare constitue un des défis de ce stage. La seconde partie traite de la paramétrisation de la segmentation et des modèles de prédiction des caractéristiques dendrométriques des arbres par A-LIDAR. Une troisième partie est consacrée à l'application des deux méthodes et à la comparaison des résultats avec ceux d'un inventaire manuel de terrain, sur trois sites indépendants de l'étape précédente. Les inventaires sur ces sites sont réalisés dans le cadre de cette étude.

### 2.1 - Choix des sites d'étude et des échantillons de travail

Les sites d'étude sont situés dans des peuplements mélangés de sapin, hêtre et épicéa des Alpes du Nord. Ces peuplements représentent la majorité des surfaces forestières à enjeu de production et de protection dans ce domaine biogéographique (ONF, 2006).

#### 2.1.1 - Données A-LIDAR

Après avoir recensé l'ensemble des données A-LIDAR disponibles sur la zone d'étude des alpes du Nord, un tri est réalisé afin de garder uniquement les sites répondant aux exigences suivantes :

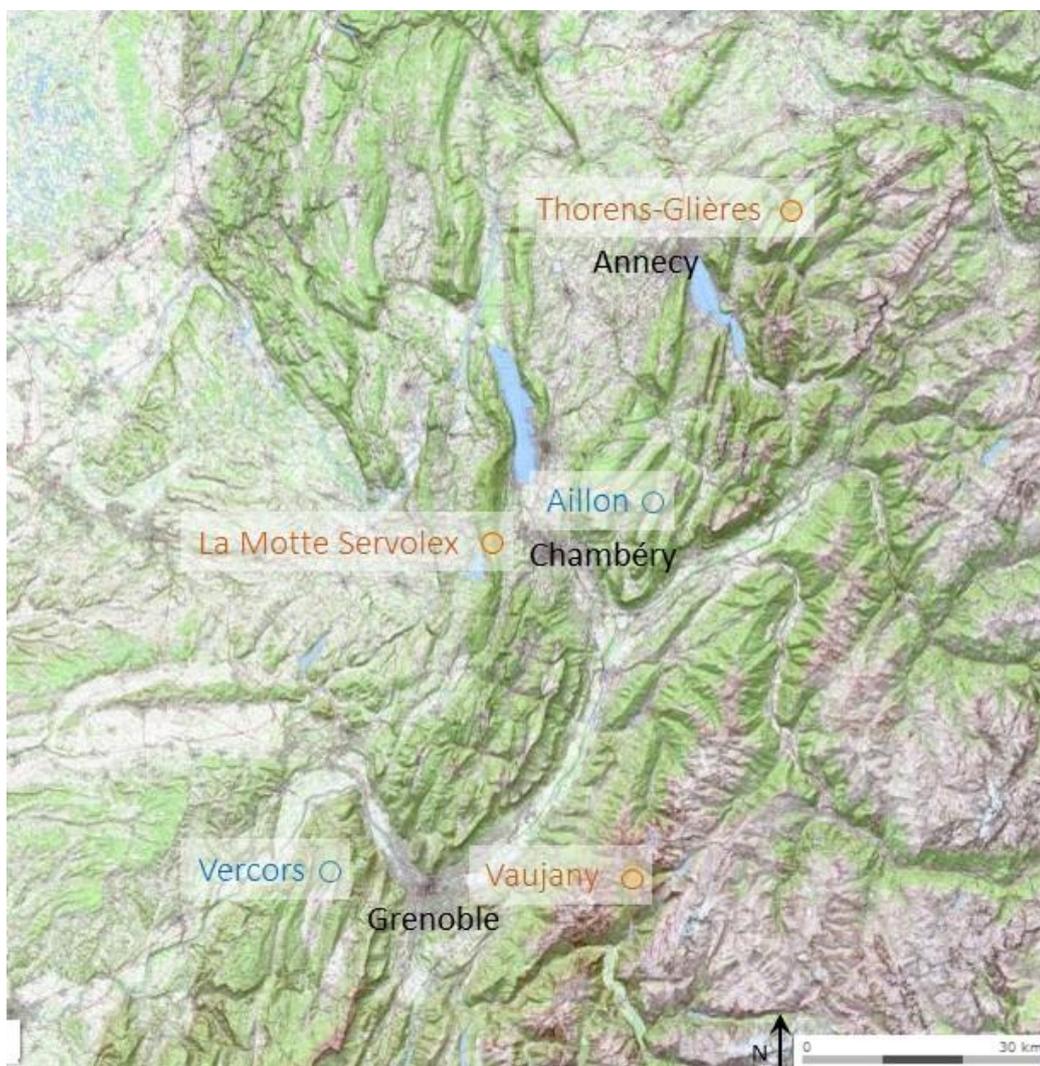
- une densité d'émission de points supérieure à 5 pts/m<sup>2</sup> (pour permettre une analyse de l'espèce et du diamètre) ;
- un vol réalisé lors des 2 ou 3 dernières années (pour limiter les différences par rapport aux inventaires qui sont réalisés sur le terrain pendant cette étude) ;
- des peuplements de montagne en mélange avec sapin, épicéa et hêtre ;
- une problématique de chute de blocs pour faire le lien avec Rockyfor3D ;
- une surface d'environ 1 ha minimum pour réaliser des simulations avec SAMSARA.

### 2.1.2 - Choix des sites en fonction de la commande

Une visite de terrain a permis de retenir trois sites d'intérêt parmi les sites A-LIDAR correspondant aux exigences de l'étude (paragraphe 2.1.1). Il s'agit de la parcelle 23 de la forêt domaniale de la haute filière (Thorens-Glières), la parcelle F de la forêt communale de Vaujany ainsi que la parcelle 26 de la forêt communale de la Motte Servolex (Figure 2).

Cette visite a permis de délimiter précisément l'emprise des zones qui vont ensuite être inventoriées et utilisées dans l'étude. Les dimensions des zones ont été adaptées aux contraintes de relief et à l'intérêt du peuplement pour l'étude.

Figure 2 : Carte de situation des trois sites d'étude (Source : Géoportail)



Les deux premiers sites respectent la totalité des exigences. Le site de la Motte Servolex a lui été sélectionné pour tester le protocole en dehors des zones de forte pente et ne respecte donc pas ce critère.

Les caractéristiques générales de ces 3 sites sont récapitulées dans le tableau suivant (Tableau 5).

Tableau 5 : Description du peuplement, de la topographie et des données A-LIDAR pour les 3 sites d'étude

Site	Thorens-Glières	Vaujany	La Motte Servolex
Surface (m <sup>2</sup> )	8 250	7 800	10 800
Altitude moyenne (m)	1 435	1295	970
Pente moyenne (%)	75	65	0
Structure	Régularisé BM à ouvert	Régularisé GB	Régularisé GB
Composition	hêtre > sapin > épicéa	hêtre > sapin > épicéa	sapin > épicéa > hêtre
Origine des données ©	RTM 74	IRSTEA	SINTEGRA
Date de vol	2013	2015	2014
Densité moyenne d'émission (pts/m <sup>2</sup> )	22	20	82

### 2.1.3 - Echantillons utilisés pour l'analyse de la détection des houppiers dans le A-LIDAR

Plusieurs échantillons sont nécessaires à la fois pour calibrer et pour valider l'algorithme de segmentation des houppiers.

#### Echantillon de calibration

L'algorithme de segmentation a été calibré sur un échantillon de 10 placettes mesurées préalablement dans le cadre du projet FORESEE. Ces placettes ont été choisies de façon à être équilibrées en composition et en mélange, et réparties sur trois sites survolés au A-LIDAR (Tableau 6 et Figure 2).

Tableau 6 : Description des vols A-LIDAR utilisés pour réaliser les échantillons de calibration et de validation

	Aillon (73)	Vercors (38)	
Origine des données ©	CG-73	IRSTEA (projet Interreg Manfred)	
Date de vol	Juillet 2011	Septembre 2010	Août 2011
Densité moyenne d'émission (pts/m <sup>2</sup> )	12	12	12

Sur ces dix placettes, toutes les coordonnées des arbres de plus de 17,5 cm de diamètre ainsi que leurs caractéristiques dendrométriques étaient disponibles. Pour chacun des 225 arbres, le nuage de points A-LIDAR et le plan des arbres ont été visualisés conjointement dans *CompuTree*. Ceci a permis de faire une correspondance exacte entre les coordonnées de l'apex de chaque arbre et l'identifiant de l'arbre mesuré sur le terrain. Différents types de litiges d'appariement sont détaillés dans le paragraphe 2.3.1.3.

#### Echantillon de validation à l'échelle de l'arbre

Au moment de la validation de l'algorithme, il est intéressant de vérifier s'il existe des biais par rapport à différents facteurs comme l'espèce, le diamètre, la structure, la composition et le site. Pour cela un échantillon de 426 arbres, équilibré selon ces différents critères, a été sélectionné parmi des placettes FORESEE couvertes par les trois vols présentés pour l'échantillon de calibration.

Un long travail a été nécessaire pour mettre en correspondance, les apex des arbres avec le plan des arbres réalisé sur le terrain. Cet échantillon permet une évaluation robuste des taux de détection et des liens entre le LIDAR et les caractéristiques des arbres.

## **Echantillon de validation à l'échelle du peuplement**

Pour connaître le taux de détection de l'algorithme, il est important de le valider à l'échelle du peuplement. Cette évaluation a été réalisée sur 29 placettes de l'IRSTEA, et une comparaison sur le taux de détection et l'erreur de commission a également été réalisée avec un algorithme de référence de l'IRSTEA (Eysn et al., 2015; Monnet et al., 2010).

### **2.1.4 – Echantillons de l'analyse des modèles de prédiction de l'espèce, de la hauteur et du diamètre**

L'analyse de la prédiction des caractéristiques des arbres n'a de sens que si les arbres ont été préalablement bien détectés et dont la couronne a correctement été modélisée.

L'échantillon se base donc sur les 285 arbres bien détectés dans l'échantillon de 426 arbres servant à la validation de la segmentation à l'échelle de l'arbre (paragraphe 2.1.3).

La calibration est réalisée sur un échantillon de 150 arbres (50 sapins, 50 épicéas et 50 feuillus), en tâchant de les répartir au mieux selon les catégories de diamètre, la composition (résineux, pur, mixte) et la structure (régulier, irrégulier). Chaque houppier a été vérifié manuellement pour ne garder que les arbres bien modélisés.

Les 135 arbres correctement détectés restants sont rassemblés dans l'échantillon de validation des modèles. Cet échantillon de validation n'est donc pas complètement équilibré, surtout selon les espèces, mais il a l'avantage de pouvoir fournir une analyse indépendante.

## **2.2 - Cartographie des arbres au T-LIDAR**

La mise en place d'un protocole d'inventaire multi-scan sur une surface de l'ordre d'un hectare est un défi qui n'a pas encore été expérimenté dans des zones de fortes pentes (d'après la bibliographie consultée), et constitue l'une des originalités de ce stage.

Le matériel mis à disposition pour cette étude est un scanner T-LIDAR FARO® Focus 3D (fiche technique en annexe 1) avec 6 sphères de calage calibrées et le logiciel de traitement des scans FARO® Scene.

### **2.2.1 - Protocole de mesure en forêt**

#### **2.2.1.1 - Enseignements tirés de l'essai de la Motte Servolex**

Un premier inventaire au T-LIDAR d'environ 1 ha a été réalisé en une journée sur le marteloscope de la Motte Servolex en Décembre 2015 par l'équipe R&D de l'ONF. Une cinquantaine de scans a été nécessaire pour décrire la zone. Ils ont été implantés en bandes continues dans lesquelles les scans sont recalés entre eux à l'aide des sphères de calage FARO, qui sont déplacées au fur et à mesure de l'avancement du scanner. Les bandes sont ensuite recalées entre elles à l'aide de sphères en polystyrène à l'extrémité de chaque bande (plan des scans en annexe 2).

La densité de points choisie (1 pt/cm<sup>2</sup> à 10m) semble suffisante pour une analyse précise de la position et du diamètre des arbres. De plus la durée d'un scan avec cette résolution est de 4 min 34 s, ce qui permet d'avancer rapidement. Cette résolution a donc été conservée pour la suite des inventaires.

L'analyse du nuage de points, réalisée dans le cadre de ce stage, a soulevé plusieurs problèmes :

- certains arbres ne sont pas visibles car cachés derrière d'autres arbres depuis le scanner (on parle alors d'occlusion) ;
- il y a des erreurs importantes de calage entre les bandes, et particulièrement au milieu de celles-ci.

Il convient donc de réfléchir en amont à partir de ces résultats pour mettre en place un protocole fiable avant de l'appliquer à grande échelle.

### 2.2.1.2 - Mise en place du nouveau protocole

Une notice opérationnelle d'utilisation du scanner FARO® Focus 3D a été mise au point au cours de ce stage (Annexe 3).

Plusieurs tests préliminaires ont été réalisés pour définir un nouveau protocole de relevé multi-scan de la position et des caractéristiques des arbres au T-LIDAR dans des peuplements de montagne dans des conditions de forte pente. Différents éléments ont ainsi été pris en compte.

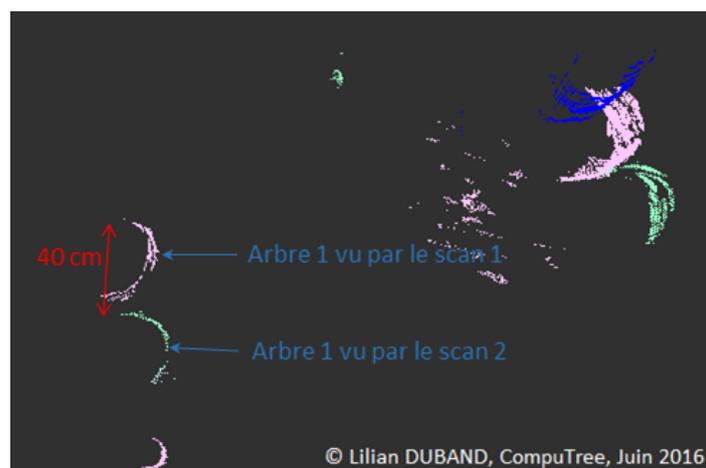
#### Visibilité de tous les arbres

Différents tests ont montré qu'une distance de 15 m dans le sens de la pente permet de limiter les occlusions, et permet de n'oublier aucun arbre dans un peuplement relativement dense. Une distance de 15 m entre chaque position de scan signifie que chaque arbre est au maximum à  $15 \div \sqrt{2} \approx 10,6$  m de la position de scan la plus proche.

#### Calage des scans

L'analyse de l'essai réalisé à la Motte Servolex a montré que les scans n'étaient pas bien calés entre eux, en particulier ceux appartenant à des bandes différentes qui pouvaient avoir jusqu'à 40 cm de décalage (Figure 3). Ce décalage induit une erreur significative dans le positionnement des arbres, conduit à la duplication des arbres et rend parfois impossible la mesure du diamètre.

Figure 3 : Erreurs de calage entre deux scans lors de l'inventaire réalisé par l'ONF à la Motte Servolex en Décembre 2015

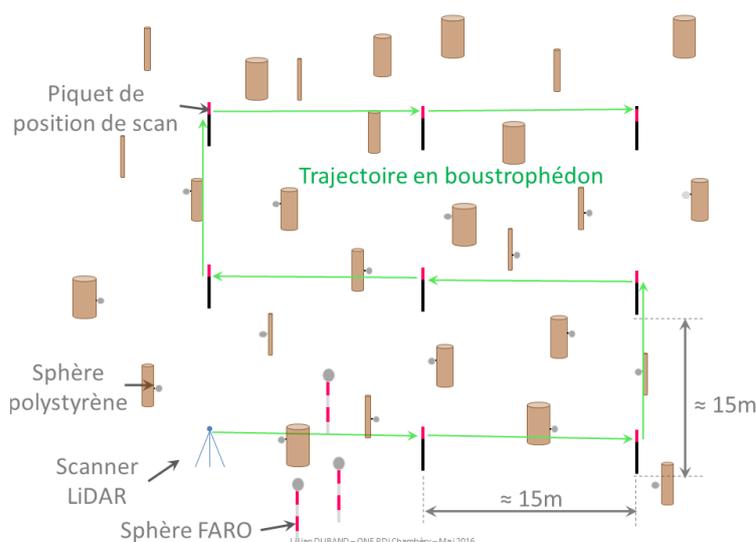


Le calage relatif de tous les scans adjacents devrait permettre de limiter les erreurs de calage. En effet un tel dispositif est anisotrope : chaque scan est calé de la même manière avec tous les scans qui l'entourent. Le scanner se déplace alors dans la grille des scans en suivant une trajectoire en forme de serpent appelée en boustrophédon (Figure 4).

Une amélioration du calage est aussi possible au niveau des sphères qui servent de points de repère entre les arbres. Placer ces sphères sur des petits piquets stables bien ancrés dans le sol ou bien les fixer sur des arbres permet de limiter au maximum leurs mouvements. Ce point n'est pas négligeable car si une sphère bouge c'est la totalité de la correspondance entre les deux nuages qui est affectée.

Le calage entre deux scans nécessite au minimum 3 points de calage, c'est-à-dire 3 sphères. Or uniquement 6 sphères FARO® calibrées sont disponibles pour cette étude. L'utilisation de sphères en polystyrène permet de pallier à ce manque à moindre coût (Figure 4).

Figure 4 : Schéma de mise en application du protocole : trajectoire est sphères de calage



Néanmoins la question de la qualité du recalage avec ces sphères non calibrées se pose. Des essais ont été réalisés avec deux positions de scan à 3 m de part et d'autre des sphères (Tableau 7).

Tableau 7 : Tensions de calage des scans en fonction du type de sphère utilisé

Type de sphère	FARO®	Polystyrène	Polystyrène
Diamètre (cm)	14	15	8
Tension de calage moyenne (mm)	0,45	1,12	2,09

J'ai fait le choix de travailler avec des sphères de 8 cm de diamètre qui satisfont les exigences de calage souhaitées pour une cartographie des arbres (de l'ordre du centimètre) et qui ont le mérite d'être beaucoup plus facilement manipulables et d'avoir un coût nettement moins important.

Néanmoins, pour qu'une sphère soit correctement détectée, il faut qu'elle soit décrite par un nombre minimum de 30 points environ. Plus elle est éloignée du scanner et plus elle est petite, plus le nombre de points est réduit. Une sphère de 8 cm de diamètre est correctement visible jusqu'à 15 m avec une densité de points classique (1 pt/cm<sup>2</sup> à 10 m). Comme les sphères de calage se placent entre les scans et donc à une distance normalement inférieure à 10 m, un diamètre de 8 cm convient tout à fait pour cette utilisation avec 50 pts/sphère à la résolution de scan considérée (sans prendre en compte la divergence du faisceau).

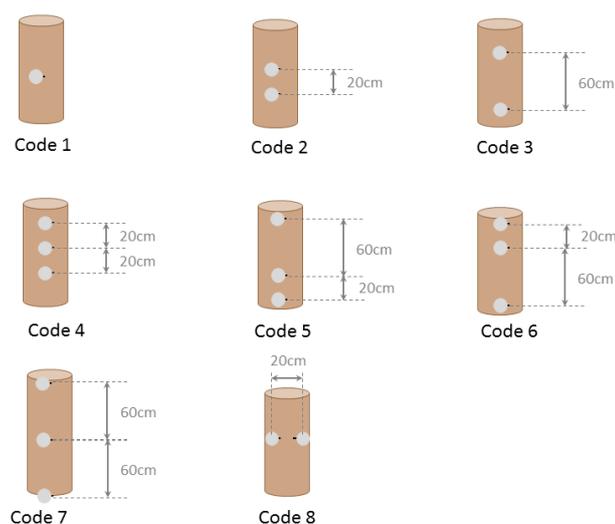
Ces hypothèses ont été vérifiées lors d'un test en conditions contrôlées (détail en annexe 4).

### Reconnaissance des espèces

Comme la détection automatique de l'espèce est complexe à mettre en place pour des espèces proches comme le sapin et l'épicéa (Othmani, 2014), un système de code détectable dans le nuage de points 3D a été mis au point (Figure 5).

Plusieurs types de cibles ont été testés : symboles 2D, panneaux 2D et sphères polystyrène 3D. Les sphères 3D offrent le meilleur résultat (car elles sont bien visibles dans toutes les directions). De plus elles présentent l'intérêt de pouvoir servir en même temps au calage des scans. Elles sont fixées sur les arbres grâce à de grands clous. Différents motifs à base d'une, deux ou trois sphères ont été mis en place (Figure 5).

Figure 5 : Schéma des 8 motifs utilisés pour différencier les espèces à partir de sphères en polystyrène



### Continuité de l'inventaire sur plusieurs jours

Une des questions méthodologiques de cette étude est de trouver une solution pour réaliser l'inventaire au T-LIDAR d'une grande zone forestière d'un hectare (voire plus). Etant donné cette surface importante et les difficultés et les risques de déplacement dans des zones de risque de chute de blocs, il est nécessaire d'avoir un système qui permette d'avoir une continuité de l'inventaire sur plusieurs jours.

La seule solution pour repositionner les nouveaux scans par rapport à ceux de la veille est de laisser des repères fixes sur place.

Le plus simple est de s'arrêter entre deux bandes. Il faut alors laisser toutes les sphères en polystyrène qui font le lien entre la bande qui vient d'être scannée et la suivante. Etant donné le coût des sphères FARO®, il n'est pas envisageable de les laisser en forêt. Cependant il est possible de fixer sur les arbres des rondelles qui s'aimantent selon une forme précise sous les sphères et qui permettent donc de replacer précisément les sphères le lendemain. Les décalages dus au déplacement des sphères calibrées d'un jour sur l'autre sont de l'ordre du millimètre (résultats en annexe 5).

Le protocole détaillé pour les inventaires au T-LIDAR des trois sites choisis est présenté en annexe 6.

### 2.2.2 - Recalage des différents scans en une zone cohérente

Une fois les différents scans réalisés sur l'ensemble de la zone d'étude, il est nécessaire de les recalcr entre eux pour pouvoir ensuite mesurer les paramètres dendrométriques des arbres.

#### 2.2.2.1 - Détection automatique des sphères et filtrage avec le logiciel FARO® Scene

Les scans téléchargés depuis le scanner sont dans un premier temps traités par le logiciel *Scene* qui filtre les points aberrants.

Ce logiciel permet également de rechercher automatiquement des sphères dont on lui spécifie le rayon. (Figure 6).

Figure 6 : Sphères détectées dans un nuage T-LIDAR avec le logiciel FARO® Scene



Comme dans toute détection automatique il y a des oublis (omissions) et des « inventions » (comissions). Une étape de filtrage manuel est donc nécessaire. Une fois les sphères correctement détectées, le logiciel recale les différents scans en une zone cohérente.

Il est ensuite possible d'exporter chaque nuage au format « .xyb », lisible dans *CompuTree*® ONF, ainsi qu'un fichier unique contenant les coordonnées des centres de toutes les sphères détectées.

### 2.2.2.3 - Estimation qualitative de la qualité du recalage

Pour vérifier la qualité du recalage, le plus simple est de découper dans chaque scan une tranche horizontale entre 1 et 2 m de haut dans le logiciel *CompuTree*. En les affichant de différentes couleurs, il est possible de voir si les scans sont bien recalés en visualisant un élément fixe par exemple un tronc.

Le logiciel *Scene* donne lui aussi une estimation de la qualité du recalage. Elle est cependant dépendante des sphères utilisées pour ce recalage.

### 2.2.3 - Détection de la position et du diamètre

La détection des troncs et l'évaluation du diamètre ont été réalisés sur la base d'algorithmes de filtrage et d'ajustement de cylindres qui ont déjà fait leurs preuves (Othmani et al., 2011). Néanmoins, quelques adaptations et développements ont été nécessaires pour optimiser la chaîne de traitements décrite ci-après :

- classification des points sol de création du MNT (identique);
- clusterisation en 3D (le nuage de points est découpé en voxels (cubes) de 5 cm de côté qui sont ensuite regroupés entre eux de proche en proche. Cette approche permet de filtrer plus facilement les branches et de séparer les différentes tiges d'une cépée lorsque celles-ci se touchent) ;
- filtrage des clusters (selon un alignement vertical pour supprimer les branches et le sous étage) ;
- détection de la position des arbres (dans une tranche de 2 à 3 m de haut, pour obtenir une meilleure séparation des jumelles) ;
- modification manuelle de ces positions (pour traiter les cas de jumelles où les deux troncs sont encore associés) ;
- squelettisation (identique) ;
- vérification manuelle de la squelettisation et filtrage (des branches encore présentes et des sphères fixées sur les arbres) ;
- détection du diamètre à 1,3 m (identique) ;
- vérification manuelle du diamètre à 1,3 m et sélection d'un autre diamètre plus représentatif le cas échéant.

Compte tenu de la surface importante traitée et du gros volume de données généré par les dizaines de scans réalisés pour chaque site, il est matériellement impossible de traiter simultanément l'ensemble de la zone. Il a donc été choisi de procéder à un dallage de la zone (12 dalles par zone) avec un tampon de 2m.

Au terme de ces étapes fastidieuses de contrôle semi-automatique un fichier de sortie fourni les coordonnées du centre ainsi que le rayon du cercle sélectionné à 1,3 m.

Le détail des étapes de *CompuTree* est disponible en annexe 7.

## **2.2.4 – Détection du code espèce**

### **2.2.4.1 - Traitement automatique des combinaisons de sphères**

Le fichier de position des sphères filtrées exporté depuis FARO® *Scene* est entré dans un script R qui détecte automatiquement la répartition 3D des sphères et en déduit l'espèce.

La première étape consiste à filtrer les sphères : une même sphère vue depuis deux scans peut porter deux noms différents et être doublonnée dans l'export depuis *Scene*.

L'algorithme (disponible en annexe 8) apparie ensuite les sphères selon les différents motifs mis en place sur le terrain. Pour chaque sphère il analyse la position de toutes les sphères présentes autour d'elle verticalement et horizontalement grâce à une sélection par cylindres.

Si jamais une sphère est détectée comme pouvant faire partie de deux motifs différents, alors il est spécifié qu'il y a un litige et donc potentiellement une erreur pour cet arbre. Une vérification de ces cas est alors nécessaire dans *Scene*. Finalement l'opérateur dispose d'un fichier de sortie avec les coordonnées de chaque groupe de sphère et l'espèce correspondante.

Le script est disponible en annexe 8.

Une notice opérationnelle a été réalisée pour décrire les différentes étapes nécessaires à la détection des espèces, depuis le filtrage des sphères dans *Scene* jusqu'au fichier des coordonnées et de l'espèce des arbres (Annexe 9).

### **2.2.4.2 - Lien entre la position, le diamètre et l'espèce**

L'appariement se fait en minimisant la distance entre la position de l'espèce et la position du diamètre pour chaque arbre.

Le résultat de cette étape est une cartographie des arbres obtenue à partir de l'inventaire T-LIDAR. La hauteur n'a pas été mesurée à partir du T-LIDAR car elle est largement sous-estimée dans un peuplement résineux ou feuillu en feuilles (la cime de l'arbre est cachée par les branches inférieures). Néanmoins le T-LIDAR permet d'acquérir de nombreuses autres informations comme le diamètre et la hauteur de la base de la couronne, le volume de l'arbre, ...

## **2.3 – Cartographie des arbres au A-LIDAR**

Il existe de nombreux algorithmes permettant de détecter automatiquement les couronnes de houppier (voir paragraphe 1.2.2.2). L'algorithme utilisé pour la cartographie est celui implémenté dans *CompuTree* : SEGMA. Il a été mis à disposition de l'ONF par B. St-Onge (Université de Québec Montréal). Cet algorithme a été sélectionné car il permet de travailler aussi bien sur un MNH que sur un MNS, et qu'il permet de récupérer facilement les enveloppes et les caractéristiques du houppier, ainsi que le nuage de points LIDAR natif non déformé par la normalisation par rapport au MNT.

### 2.3.1 - Segmentation des houppiers dans le nuage de points

L'approche individuelle à l'échelle de l'arbre nécessite au préalable de segmenter le nuage de points A-LIDAR pour avoir accès aux points de chaque arbre.

#### 2.3.1.1 - Présentation de l'algorithme SEGMA

SEGMA fait partie du groupe d'algorithmes qui travaillent sur la détection de maxima locaux à partir de rasters MNH ou MNH filtrés pour découper ensuite le nuage de points. Ces algorithmes ont de bons résultats (voir paragraphe 1.2.2.2) et sont rapides car ils ne travaillent pas directement sur le nuage de points.

Cet algorithme est implémenté mais non encore testé au démarrage de mon stage. Un de mes objectifs annexes est de tester cet algorithme et potentiellement de participer à des améliorations pour l'adapter aux peuplements mélangés et irréguliers de montagne.

#### Description de l'algorithme

*CompuTree* permet de réaliser des MNH et MNS après avoir classifié les points sols et réalisé un MNT. La résolution de ces rasters doit être d'au moins 25 cm (B. St-Onge, com. pers.). Cette fine résolution pose problème par exemple au sol sous les houppiers de résineux où il n'y a pas de points sur plusieurs mètres carrés et où il faut donc interpoler les valeurs pour créer le MNT, qui doit être à la même résolution que les autres rasters.

Comme le MNH au pas de 25 cm est très fin, il y a des cavités dans les houppiers (dues aux rayons LASER passant entre les branches). Une étape de remplissage de ces cavités est donc nécessaire. Initialement SEGMA utilise une étape de filtrage laplacien sur une fenêtre carrée (*cavity fill*). Cependant cette méthode est très sensible au paramétrage et ne permet pas dans son état actuel de remplir un MNS au lieu d'un MNT. Un autre algorithme plus souple (*pits fill*) a également été testé. Il a été développé au laboratoire de l'inventaire forestier (Véga et al., 2011).

Le MNH subit ensuite un lissage gaussien qui permet d'enlever des pics dus par exemple à des extrémités de branches. Les *maxima* locaux sont détectés sur ce raster puis eux-mêmes filtrés selon des rayons d'exclusion dépendants de la hauteur. Le MNH est inversé, puis rempli avec la technique des bassins versants pour délimiter les houppiers à partir des *maxima*. Ces enveloppes sont ensuite redécoupées en fonction d'indicateurs de pente et de forme.

Suite à cette étape la surface de chaque houppier découpé est connue. Or certaines découpes correspondent à des parties de houppier sur-segmentées et ont souvent une surface faible. Pour limiter ces sur-détections, j'ai participé au co-développement d'une étape qui filtre les résultats de la segmentation en fonction de leur surface. Cette étape génère de nouveaux *maxima* à partir desquels les enveloppes de houppier sont de nouveau créées et redécoupées pour aboutir au résultat final de la segmentation.

#### 2.3.1.2 - Méthodologie pour la paramétrisation de l'algorithme

Après quelques tests sur la paramétrisation de SEGMA, le réglage des paramètres a été séparé en deux étapes successives.

D'abord tous les paramètres qui dépendent des données LIDAR de départ et de la limite minimale de taille des arbres que l'on souhaite détecter doivent être fixés : la création des rasters, le découpage des enveloppes de houppiers et les seuils de hauteur et de surface.

Il est ensuite nécessaire de régler l'agressivité de l'algorithme, c'est-à-dire choisir s'il doit plutôt sur-segmenter ou sous-segmenter le nuage de points, en jouant sur le lissage gaussien et sur les rayons d'exclusion. Les feuillus et les conifères ne sont pas sensibles de la même manière à l'agressivité de l'algorithme. Etant donné que les conifères sont majoritaires en nombre et en valeur dans ces peuplements de montagne, l'algorithme a été paramétré pour une bonne détection des conifères, sans tenir compte des feuillus.

Le script sélectionné à l'issue des différentes modifications et paramétrages est disponible en annexe 10.

### **2.3.1.3 - Evaluation des performances de l'algorithme**

L'analyse bibliographique, a permis de définir des classes pour évaluer les performances d'un algorithme de segmentation (Koch et al., 2006).

Les classes utilisées sont les suivantes :

- un arbre terrain pour une couronne : arbre bien détecté ;
- pas d'arbre terrain pour une couronne : arbre sur-détecté ;
- un arbre terrain sans couronne : arbre non détecté ;
- plusieurs arbres terrain pour une couronne pour une couronne : arbres fusionnés.

Pour les arbres fusionnés une séparation supplémentaire a été étudiée pour obtenir plus d'information :

- arbres ayant une surface terrière relativement semblable : arbres fusionnés ;
- arbre représentant plus de 60% de la surface terrière du collectif : arbre fusionné dominant (Koch et al., 2006) ;
- autre arbre dans un collectif ayant un arbre dominant : arbre fusionné dominé.

Les performances de l'algorithme sont analysées sur les échantillons de calibration et de validation décrits au paragraphe 2.1.3.

### **Analyse des résultats sur un échantillon de validation à l'échelle de la placette et comparaison avec un algorithme développé par l'IRSTEA**

Les performances de l'algorithme SEGMA sont évaluées sur un échantillon de 29 placettes, en collaboration avec l'IRSTEA. Cette évaluation consiste en une comparaison avec l'algorithme développé dans le cadre de la thèse de J.M. Monnet (Monnet et al., 2010). Cet algorithme a servi de base à une évaluation internationale de différents algorithmes de détection en couronne dans les Alpes (Eysn et al., 2015). La correspondance entre apex et arbres de terrain est réalisée automatiquement grâce à l'algorithme développé par l'IRSTEA (Monnet and Mermin, 2014).

La comparaison est réalisée selon le taux de détection et l'erreur de comission des différentes méthodes.

Différents paramétrages de SEGMA sont testés dans l'objectif de tester l'influence :

- de l'utilisation du MNH ou du MNS en entrée (pour quantifier l'impact de la déformation du nuage par le MNT) ;
- de la méthode de remplissage des cavités (*cavity fill* ou *pits fill*) (pour trouver la méthode la plus adaptée pour cette étape importante, voir paragraphe 2.3.1.1) ;
- du filtrage sur l'aire des couronnes (pour essayer de filtrer les fractions de houppier surdétectées).

### **2.3.2 - Modélisation de l'espèce en fonction de la forme du houppier**

#### **2.3.2.1 - Différentes familles de métriques**

En sortie de *CompuTree*, SEGMA fourni un tableau avec l'identifiant de chaque couronne et un certain nombre de caractéristiques de celle-ci : surface, excentricité, circularité, ... Le raster des couronnes avec leur identifiant est ensuite importé dans R avec le nuage de points LIDAR, pour calculer d'autres métriques. C'est le nuage de points LIDAR natif qui est importé afin de ne pas modifier la géométrie des points lors d'une normalisation par le MNT (Vega et al., 2014).

Plusieurs autres familles de métriques caractérisant la distribution 3D des points sont calculées pour chaque arbre afin d'établir des modèles de prédiction de l'espèce et du diamètre :

- distribution des points dans le houppier (hauteur relative des points first, nombre de points dans différentes tranches de hauteur) ;
- géométrie des points (moyenne de la distance horizontale des points à l'apex, de la distance verticale à l'apex, des angles à l'apex) ;
- pénétrabilité du houppier (proportion de points first présents, et donc de rayons arrêtés dans une tranche de hauteur) ;
- profil vertical du houppier (les points sont représentés selon leur distance verticale et horizontale à l'apex. Sur cette représentation sont calculées : la pente de l'enveloppe du houppier par tranche de hauteur, le rapport d'aire sous cette courbe et sa convexité).

Deux principes de découpage du nuage de points en tranches de hauteur sont étudiés :

- l'approche absolue où la tranche correspond à 1 m, 2 m, ... par rapport à l'apex ;
- l'approche relative où la tranche correspond à une hauteur relative de l'arbre : tous les points au-dessus de 90<sup>e</sup> percentile de hauteur par exemple.

La liste complète des métriques calculées est décrite en annexe 11.

### 2.3.2.2 - *Choix de la méthode de modélisation des variables utilisées*

Deux méthodes ont été utilisées pour prédire l'espèce à partir de la forme du houppier :

- un modèle *random forest* où une sélection parcimonieuse de variables explicatives a été réalisée à l'aide de la procédure VSURF, en utilisant l'ensemble des 89 variables explicatives ;
- un modèle logistique polytomique basé sur une sélection de variables peu corrélées issues de plusieurs essais avec la méthode *random forest* décrite précédemment (Yee et al., 2010).

La régression logistique polytomique est une généralisation de la régression logistique qui permet de prédire plusieurs niveaux pour un même facteur. Elle permet, contrairement à la modélisation *random forest*, d'interpréter les coefficients attribués à chaque variable. Dans cette étude il y a 3 modalités à prédire pour les trois groupes d'espèces : EPC, SAP et FEU.

### 2.3.2.3 - *Méthode statistique et logiciel utilisés*

Le logiciel *R* a été utilisé pour réaliser ces modélisations (R Core Team, 2016). Les bibliothèques *Vsurf* et *VGAM* permettent respectivement de sélectionner les variables avec *random forest* et d'appliquer la modélisation avec la régression logistique polytomique.

#### **La sélection des variables avec *Vsurf* et *random forest***

La méthode *Random forest* se base sur un grand nombre d'arbres de décisions pour prédire une variable. Pour les nœuds de chaque arbre, l'algorithme cherche à trouver le critère qui va le mieux séparer la population en deux groupes distincts. Chaque arbre est construit à partir de variables tirées au hasard dans le lot de variables d'entrée.

Il faut dans un premier temps fixer le nombre de variables qui sont tirées au sort à chaque tour. Ensuite l'algorithme sélectionne des variables d'intérêt qui ressortent le plus souvent dans les arbres et sélectionne les variables les plus explicatives parmi celles-ci (Genuer et al., 2014).

J'ai réalisé ce processus pour toutes les variables mais aussi par famille de variables. L'objectif est de ne pas avoir de variables trop corrélées dans l'échantillon final et donc de sélectionner les variables les plus importantes par famille.

Le résultat de cette étape est une sélection de variables peu corrélées qui discriminent bien l'échantillon par rapport aux espèces.

### 2.3.3 - Modélisation de la hauteur réelle en fonction de la hauteur LIDAR et de la pente locale

Le diamètre est fortement corrélé à la hauteur de l'arbre. Cependant la hauteur obtenue par LIDAR est rarement la hauteur exacte de l'arbre (il faudrait pour cela un retour exactement sur l'apex). La hauteur est calculée par rapport au MNT et si l'apex n'est pas à l'aplomb du tronc il peut y avoir un biais dans le cas des fortes pentes.

Un modèle linéaire additif tenant compte de la pente a donc été étudié pour prédire la hauteur réelle à partir de la hauteur issue du A-LIDAR.

### 2.3.4 - Modélisation du diamètre

Deux méthodes ont été évaluées pour prédire de diamètre des arbres à partir des couronnes :

- Un modèle linéaire empirique qui prédit le diamètre à partir d'une sélection de variables issues d'un travail avec *Vsurf* sur *random forest* (voir paragraphe 2.3.2.3).
- Un modèle allométrique inverse (Deleuze et al., 1996, Dhote et al., 1994), liant le diamètre à la hauteur de l'arbre, elle-même prédite à partir de la hauteur LIDAR de chaque apex.

La validité des modèles a été évaluée à partir d'une analyse de la distribution des résidus sur le jeu de validation indépendant.

**Pour obtenir la cartographie des arbres à partir du A-LIDAR sur un site, le nuage de points LIDAR est d'abord segmenté avec SEGMA. Dans un second temps l'espèce, la hauteur et le diamètre sont prédits pour chaque houppier découpé, avec les modèles décrits dans les paragraphes précédents.**

## 2.4 - Modélisation des peuplements à partir des cartographies et comparaison

### 2.4.1 - Recalage des différentes cartographies

Avant de pouvoir comparer différentes cartographies, il faut qu'elles soient dans le même référentiel.

#### 2.4.1.1 - Recalage du nuage terrestre sur le nuage aérien

Le nuage de points A-LIDAR est fourni par le prestataire en *lambert 93*. Le nuage de points T-LIDAR est quant à lui dans un système relatif où l'origine est le centre du premier scan.

Les trois sites étudiés ont été positionnés en essayant de trouver des points qui pourraient servir de repère entre les deux nuages de points : route, piste forestière, arbre isolé, ...

Le recalage des deux nuages est réalisé manuellement. Il consiste à repérer un point commun aux deux nuages et à translater le nuage terrestre pour que les deux points aient finalement la même coordonnée. Cette opération est répétée tant qu'un décalage visuel est constaté entre les deux nuages. Aucune rotation n'est nécessaire car le nuage de points est orienté au Nord grâce à une boussole intégrée dans le T-LIDAR.

#### 2.4.1.2 - Cartographie manuelle des arbres réalisée par l'IRSTEA

En parallèle de l'inventaire réalisé au T-LIDAR, une cartographie des arbres est réalisée sur la même zone par l'IRSTEA.

L'azimut et la distance de tous les arbres sont mesurés par rapport à plusieurs repères fixes, à l'aide d'une boussole et d'un vertex ©Haglöf. Les diamètres sont inventoriés au ruban et les hauteurs mesurées au vertex ©Haglöf. Un repère fixe est positionné avec un récepteur GNSS.

### 2.4.1.3 - Appariement des arbres des trois cartographies

Les trois méthodes de cartographie des arbres ont été mises en oeuvre sur chacun des sites : T-LIDAR (paragraphe 2.2), A-LIDAR (paragraphe 2.3) et manuelle (paragraphe 2.4.1.2). Tous les plans ont ensuite été ramenés dans le même système de projection (*lambert 93*), ce qui permet de les comparer.

La correspondance entre les arbres issus des trois méthodes de cartographie est réalisée manuellement compte tenu du fort décalage des positions. Ce décalage concerne notamment les feuillus dont l'apex A-LIDAR peut se trouver à plusieurs mètres par rapport à la position du tronc, du fait de la pente et de l'attraction du houppier vers la lumière.

Pour l'appariement entre le A-LIDAR et la cartographie manuelle, plusieurs cas sont à considérer :

- bonne détection (un arbre A-LIDAR correspond à un unique arbre terrain) ;
- fusion (plusieurs arbres terrain correspondent à un arbre A-LIDAR) ;
- découpe (plusieurs arbres A-LIDAR correspondent à un arbre terrain).

Il est difficile de matérialiser très précisément les limites du site sur le terrain. Il y a donc des arbres détectés par le LIDAR aérien ou terrestre qui n'ont pas été mesurés manuellement et inversement au niveau des limites de la zone. Ces arbres ont été repérés afin de pouvoir être éliminés de l'échantillon d'étude par la suite pour ne pas fausser les comparaisons.

Tous ces éléments rendent l'appariement des cartographies A-LIDAR et manuelle délicat. Cet appariement peut donc conduire à des erreurs importantes.

### 2.4.2 - Comparaison des trois cartographies des arbres

#### Comparaison des cartographies à l'échelle de l'arbre

Une fois les arbres appariés, il est possible de les comparer quantitativement. Cette comparaison est réalisée à l'échelle de l'arbre pour son diamètre et son espèce ; à l'échelle du peuplement avec le nombre d'arbres et la surface terrière par espèce et par classe de diamètre.

La comparaison à l'échelle de l'arbre nécessite de réduire l'échantillon aux arbres qui sont correctement visibles par chacune des méthodes. Ceci est délicat notamment avec le A-LIDAR pour lequel il faut sélectionner uniquement les houppiers qui ne sont ni découpés ni fusionnés.

#### Comparaison des trois cartographies à l'échelle du peuplement après simulation dans SAMSARA

Les trois cartographies sont traduites en trois listes d'arbres avec leurs caractéristiques, mesurées ou prédites selon la méthode, formatées pour être utilisées dans SAMSARA. Les sorties sont comparées au bout de 50 et 100 ans, sur la composition et la structure du peuplement en étudiant la répartition de la surface terrière par espèce et par classe de diamètre.

La régénération voire les jeunes arbres peuvent être générés automatiquement par SAMSARA. Etant donné le temps disponible dans cette étude, l'impact des différentes méthodes de caractérisation de la régénération n'a pas été étudié et les arbres ayant un diamètre inférieur à 17,5 cm ont été modélisés automatiquement par SAMSARA.

## 2.4.4 – Cartographie sur de grandes surfaces : application de SEGMA sur un massif

Afin de rendre possible l'extraction des couronnes des arbres sur l'ensemble d'un massif forestier, une procédure automatique par dalles a été mise au point pour ensuite appliquer l'algorithme SEGMA dans *CompuTree*.

Le massif étudié est situé au Petit Bornand (74) et, représente 400 ha de forêt. La zone a été découpée en 16 dalles de 500 m de côté et avec 25 m de tampon. SEGMA est ensuite appliqué sur chacune des dalles et les rasters de couronne ainsi que les métriques sont finalement rassemblées pour obtenir les informations à l'échelle de l'arbre sur les 400 ha du massif.

## 3 - Analyse des résultats

### 3.1 - Analyse descriptive des différents échantillons utilisés

Les différents échantillons ont été construits à partir des placettes du projet FORESEE (voir paragraphe 2.1.3). Leurs caractéristiques sont récapitulées dans le Tableau 8.

Tableau 8 : Description des principaux paramètres dendrométriques des jeux de calibration et de validation utilisés dans cette étude

Nb plac	Nb arb	Ess (en nb d'arbres)	D (cm) Dmin Dmoy Dmax	H (m) Hmin Hmoy Hmax	N (N/ha) Nmin Nmoy Nmax	G (m <sup>2</sup> /ha) Gmin Gmoy Gmax	Sites (en nb de placettes)	Composition (en nb de placettes)	Structure (en nb de placettes)
<b>Echantillon de calibration de la segmentation, à l'échelle placette</b>									
10	225	EPC : 94 SAP : 82 FEU : 49	17,5 35,8 95,1	5,7 22,7 43,6	212 312 379	19 37 55	AIL : 4 BEA : 3 VNO : 3 VNE : 1	SAP : 2 RES : 1 EPC : 3 mixte : 3	Reg : 5 Irr : 5
<b>Echantillon de validation de la segmentation, à l'échelle arbre</b>									
96	426	EPC : 150 SAP : 150 FEU : 126	10 44,8 95,1	10,6 26,8 43,6	57 379 1004	12,9 40 98,8	AIL : 32 VNO : 30 VNE : 34	EPC : 22 SAP : 18 RES : 18 mixte : 38	Irr : 31 Reg : 65
<b>Echantillon de validation de la segmentation à l'échelle de la placette</b>									
29	364 7	- - -	- - -	- - -	271 477 1124	14,9 33,6 61,6	-	EPC : 50 SAP : 27 FEU : 23	-
<b>Echantillon de calibration des modèles dendrométriques</b>									
76	150	EPC : 50 SAP : 50 FEU : 50	15,4 44,9 95,1	10,6 26,3 40	57 380 1004	12,9 40,6 98,8	AIL : 28 VNO : 21 VNE : 21	EPC : 13 SAP : 15 RES : 11 Mixte : 37	Irr : 23 Reg : 53
<b>Echantillon de validation des modèles dendrométriques</b>									
63	135	EPC : 62 SAP : 66 FEU : 7	20,4 56,3 93,6	19 30,6 43,6	57 364 1004	18,2 43,6 98,8	AIL : 25 VNO : 22 VNE : 16	EPC : 11 SAP : 14 RES : 10 Mixte : 28	Irr : 17 Reg : 46

Abréviations : AIL : Aillon (73), BEA : Beaufort (73), VNO : Vercors Nord-Ouest (38), VNE : Vercors Nord-Est (38), Irr : Irrégulier, Reg : Régulier

## 3.2 - Analyse des temps pour chaque méthode

### 3.2.1 - Analyse des temps d'inventaire sur les trois sites choisis

Les inventaires au T-LIDAR et manuel ont été réalisés à quelques jours d'écart et donc sensiblement dans les mêmes conditions pour chacun des trois sites étudiés.

Tableau 9 : détail des temps d'inventaire manuel et T-LIDAR pour les 3 sites d'étude

	Thorens-Glières	Vaujany	La Motte Servolex
Pente moyenne (%)	75	65	0
Densité de tiges	forte	moyenne	faible
Temps T-LIDAR (h)	119,5	50	28
<b>Temps T-LIDAR (h/ha)</b>	<b>145</b>	<b>64</b>	<b>26</b>
Temps manuelle (h)	97 (manque hauteurs)	42,5	25
<b>Temps manuelle (h/ha)</b>	<b>118 (manque hauteurs)</b>	<b>55</b>	<b>23</b>
<b>T-LIDAR/manuelle</b>	<b>1,228</b>	<b>1,163</b>	<b>1,130</b>

Le Tableau 9 montre une forte variabilité du temps passé pour inventorier les sites. Ils sont du même ordre de grandeur entre le T-LIDAR et la méthode manuelle, mais varient d'un facteur 1 à 5 selon la situation.

Les principaux facteurs pour le T-LIDAR sont la pente, l'état du sol (difficulté de progression avec un matériel coûteux) et la visibilité dans le peuplement (importance du nettoyage du sous-étage et des branches basses).

Pour la cartographie manuelle la pente et l'état du sol influent sur la progression ainsi que la densité de tiges. En effet plus il y a de tiges (en particulier des cépées à Thorens-Glières), plus il y a de mesures à prendre et de risques d'erreur. Etant donné le nombre restreint de sites et la forte variabilité de ces paramètres, ces effets restent difficiles à évaluer.

Il faut également noter que le premier test en grandeur réelle du protocole d'inventaire au T-LIDAR a été réalisé sur le site de Thorens-Glières, avec probablement une efficacité moindre que sur les deux autres sites où les opérateurs étaient plus aguerris.

De plus l'inventaire au T-LIDAR nécessite un nettoyage du sous-étage et des branches basses. Ce nettoyage a profité également à l'inventaire manuel en facilitant la visibilité et la progression dans le peuplement. Cependant comme l'inventaire T-LIDAR a été réalisé avant l'inventaire manuel, il n'est pas possible de quantifier cet effet.

### 3.2.2 - Analyse détaillée des temps pour le site de Vaujany

Pour des questions de temps de traitement, toutes les étapes méthodologiques du traitement des nuages T-LIDAR n'ont pas pu être appliquées aux trois sites d'étude. Le site de Vaujany est traité en priorité car la zone qu'il décrit a déjà fait l'objet analyses dans le cadre des chutes des blocs. Tous les résultats dans la suite du rapport ne seront donnés que pour le site de Vaujany, qui représente une surface de 7 800 m<sup>2</sup>.

## Cartographie au T-LIDAR

Le suivi temporel des différentes étapes est récapitulé dans le Tableau 10. Il prend en compte l'application des étapes mais pas le temps de développement.

Tableau 10 : Détail du temps consacré aux différentes étapes du processus de cartographie au T-LIDAR

Poste	Temps consacré (h)
Préparation du site	13,0
Réalisation des scans	37,0
<b>Total terrain</b>	<b>50,0</b>
Appariement des scans et vérification	7,5 (dont 3 auto)
Agrégation et dallage, recalage	3,0 (dont 2 auto)
Position et diamètre	12,0
Espèces	0,1
Jointure essence et diamètre	0,1
<b>Total traitement</b>	<b>22,7 (dont 5 auto)</b>
<b>Total</b>	<b>72,7 (dont 5 auto)</b>

Pour l'inventaire de terrain, c'est surtout la réalisation des scans qui est gourmande en temps dans ce contexte de forte pente.

Pour le traitement des données, l'appariement des scans et sa vérification sont complexes du fait du grand nombre de scans. Le système de détection de l'espèce à partir des sphères mis au point dans le cadre de ce stage semble très efficace puisque le temps de traitement est de seulement 0,1 h. C'est la détection de la position et du diamètre qui est l'étape la plus fastidieuse. Avec 12 h de traitement, ce poste représente plus de la moitié du temps de traitement des données.

Seulement 22 % du temps de traitement est automatisé.

## Cartographie au A-LIDAR

Tableau 11 : Détail du temps consacré aux différentes étapes du processus de cartographie au A-LIDAR

Poste	Temps consacré (h)
Acquisition des données	1,0 (si uniquement la petite zone à voler)
Réception des données	4,0 (pour toute une zone A-LIDAR)
Dallage de la zone	0,2
Segmentation	0,2
Extraction de la zone dans le tampon	0,2
Prédiction de l'espèce	0,2
Prédiction du diamètre	0,2
<b>Total</b>	<b>6,0</b>

Le temps d'extraction des couronnes des arbres à l'aide de SEGMA est très rapide puisque cela représente 5 h (Tableau 11). La réception des données est la plus coûteuse en temps. Or cette étape est très peu sensible à la surface d'acquisition, qu'elle fasse quelques hectares ou quelques dizaines de kilomètres carrés.

Bien entendu le temps de développement et de validation des modèles n'est pas pris en compte. Ils sont juste appliqués et vérifiés dans cette chaîne de traitement.

Si une calibration précise est nécessaire sur la zone, le temps d'inventaire nécessaire à la calibration et à la validation des modèles devient le poste le plus important.

### Comparaison des trois méthodes

Les résultats synthétiques des temps consacrés pour chacune des trois méthodes sont récapitulés dans le Tableau 12.

Tableau 12 : Synthèse des temps d'inventaire et de traitement pour les 3 méthodes de cartographie sur le site de Vaujany

Méthode	Mesures manuelles	T-LIDAR	A-LIDAR
Inventaire (h)	42,5	50,0	1,0
Traitement (h)	10,00	22,6	5,0
<b>Total (h)</b>	<b>52,5</b>	<b>76,6</b>	<b>6,0</b>

Que ce soit pour la cartographie manuelle ou T-LIDAR, l'inventaire est le poste majoritaire. Cela peut s'expliquer par la forte pente (65 % en moyenne) et les nombreux blocs rocheux au sol qui rendent la progression difficile et dangereuse. Pour le A-LIDAR, le temps d'inventaire est défini nul car les modèles sont calibrés sur des données déjà acquises. C'est donc de loin la méthode la plus économe en temps. Le traitement des données T-LIDAR est deux à quatre fois supérieur à ceux des autres méthodes.

Cette analyse sur le temps de mise en œuvre ne doit pas faire oublier l'investissement important que représente un scanner T-LIDAR ainsi que le coût relativement élevé des données A-LIDAR.

La seule comparaison des temps ne peut permettre de juger de la pertinence des différentes méthodes de cartographie, il faut également étudier quelles sont les données fournies et avec quelle précision.

## 3.3 – Détection et caractérisation des tiges au A-LIDAR

### 3.3.1 - Résultats de la segmentation et tests de l'algorithme SEGMA

#### Analyse détaillée sur l'échantillon de calibration

La calibration de l'algorithme de segmentation est une étape importante car elle conditionne les résultats des différents modèles qui s'appliquent par la suite aux houppiers découpés. L'échantillon utilisé est décrit dans le paragraphe 2.1.3, et les différents cas de détection dans le paragraphe 2.3.1.3.

Tableau 13 : Synthèse des résultats de détection des houppiers de l'algorithme SEGMA sur l'échantillon de calibration

Type de détection	Effectif	Proportion du nombre total d'arbres (%)
Bien détecté	109	48
Fusion dominant	11	5
Fusion	69	31
Fusion dominé	13	6
Non détecté	23	10
Sur détecté	48	21

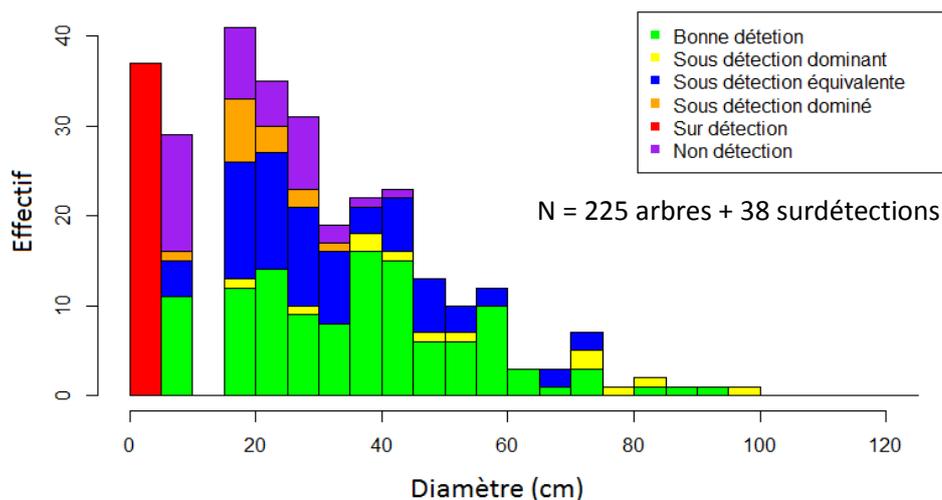
L'algorithme SEGMA de détection des houppiers peut être considéré comme efficace puisque sur 225 arbres, seuls 10% des arbres ne sont pas du tout détectés (Tableau 13). Cependant 41% des couronnes sont

fusionnées. Les fusions d'arbres dominés, qui représentent 6%, restent difficiles à détecter quel que soit le paramétrage. En revanche les arbres fusionnés de taille équivalente représentent 31% et peuvent être plus ou moins bien détectés selon le paramétrage.

Pour les épicéas, les arbres fusionnés représentent 26% de la population, 36% pour les sapins et 31% pour les feuillus. Plus de 20% des tiges sont sur-détectées, c'est-à-dire « inventées » par l'algorithme.

Avec la classification utilisée dans la littérature (Eysn et al., 2015; Monnet et al., 2010), le taux de détection est de 67% et l'erreur de comission de 21%.

Figure 7 : Type de détection des arbres par SEGMA en fonction de leur diamètre sur l'échantillon de calibration



La Figure 7 montre que ce sont les arbres de grand diamètre qui sont les mieux détectés, conséquence de leur taille et du fait qu'ils dominent le peuplement. Certains de ces arbres de gros diamètre sont fusionnés avec des arbres de petit diamètre mais restent bien détectés car ils représentent une grande majorité du collectif. La majorité des arbres non détectés sont de petit diamètre (moins de 30 cm). Le diamètre des arbres sur-détectés n'est pas connu et ils sont donc représentés pour un diamètre de 0 cm.

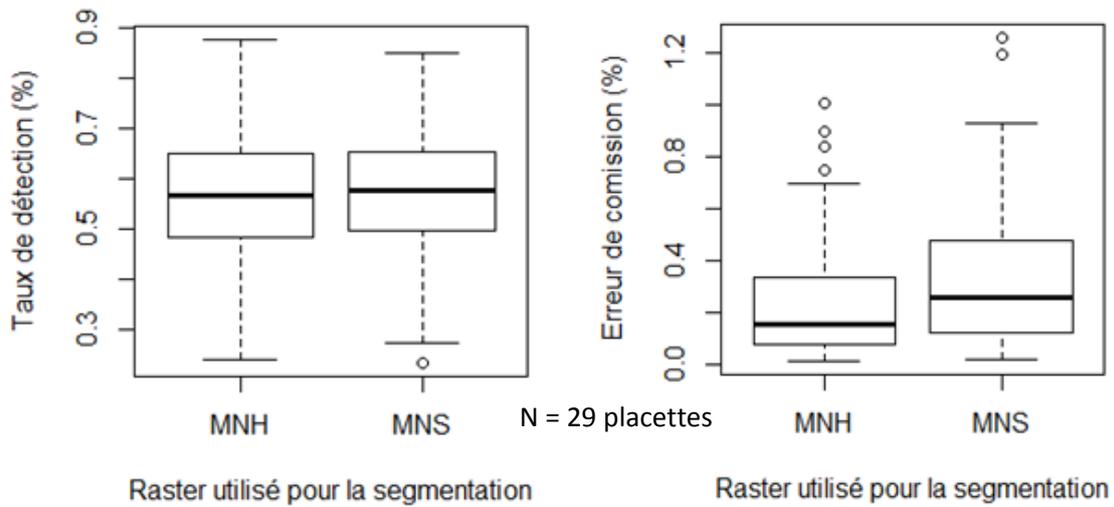
### Comparaison avec un algorithme de l'IRSTEA à l'échelle de la placette

Pour analyser les performances de SEGMA et définir le paramétrage optimal, huit extractions ont été réalisées sur 29 placettes à l'aide de SEGMA avec des paramétrages différents. Les résultats sont comparés à un algorithme de référence de l'IRSTEA (Eysn et al., 2015; Monnet et al., 2010), appliqué sur les mêmes placettes.

L'influence de trois facteurs a été évaluée (voir paragraphe 2.3.1.3) :

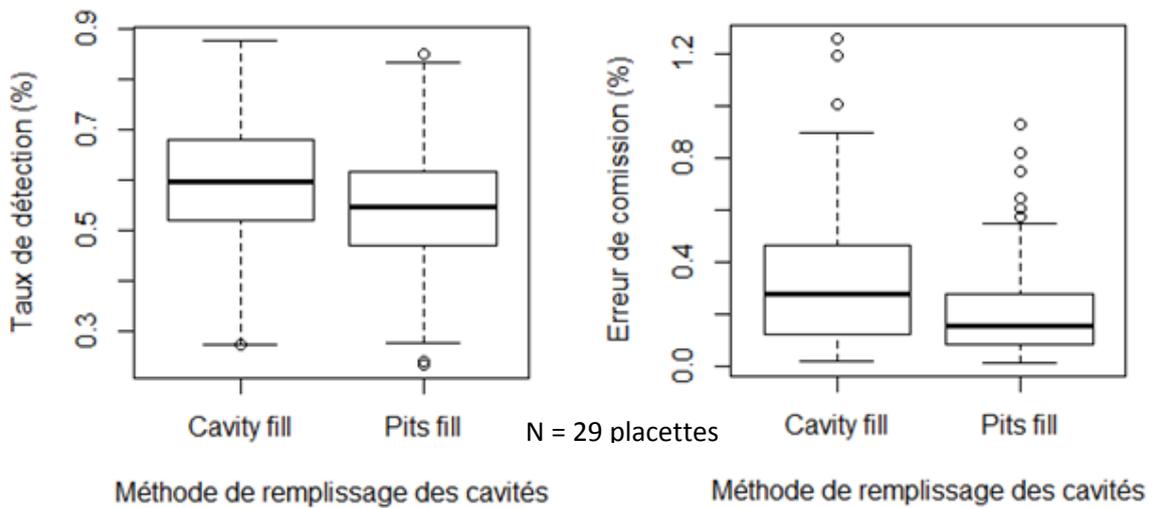
- le travail sur un MNH ou un MNS (Figure 8) ;
- le remplissage des cavités du raster avec la fonction *cavity fill* (SEGMA) ou *pits fill* et *upper outliers removal* (VEGA) (Figure 9) ;
- le filtrage sur l'aire des couronnes (Figure 10).

Figure 8 : Impacts du raster utilisé dans SEGMA sur le taux de détection et l'erreur de comission de la segmentation (box plot)



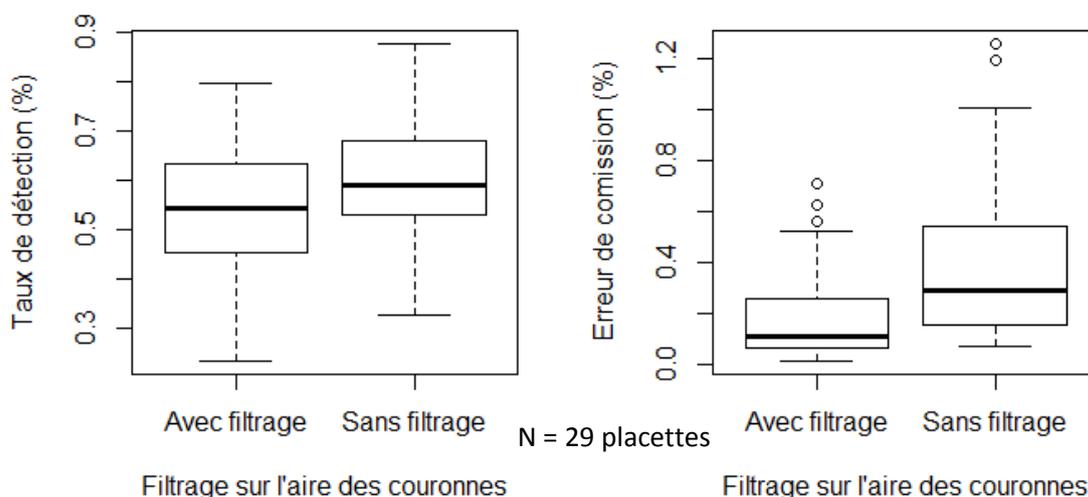
Sur 29 placettes, le taux de détection est équivalent lorsque l'on utilise le MNH ou le MNS. Il varie cependant beaucoup selon les placettes (de 27 à 90 %), avec une médiane à 58 %. En revanche, avec une médiane à 32%, l'erreur de comission est plus forte lorsque la segmentation est réalisée sur le MNS.

Figure 9 : Impacts de la méthode de remplissage des cavités utilisée dans SEGMA sur le taux de détection et l'erreur de comission de la segmentation (box plot)



Sur 29 placettes, la fonction *pits fill* apparait légèrement moins performante en termes de détection (médiane à 55 %) que la fonction *cavity fill* (médiane à 60 %) (Figure 9). Cependant elle produit une erreur de comission nettement moins importante (médiane à 18 %).

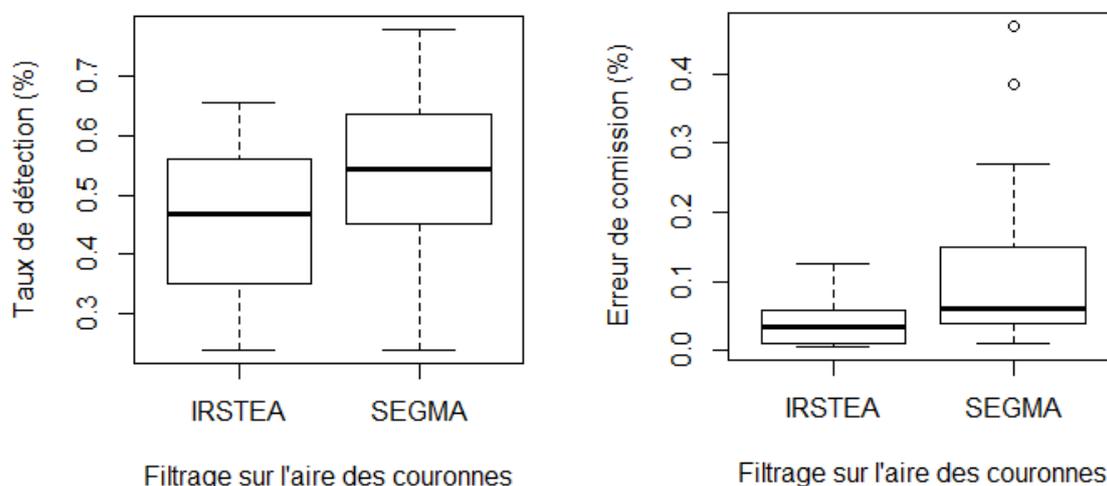
Figure 10 : Impacts du filtrage sur l'aire des couronnes dans SEGMA sur le taux de détection et l'erreur de comission de la segmentation



Sur les 29 placettes, le filtrage sur l'aire conduit à un taux de détection plus faible (médiane à 55 % au lieu de 60 %), ce qui est cohérent car il élimine des couronnes (Figure 10). Cependant il diminue fortement l'erreur de comission (de 35 % à 15 %).

L'objectif de la détection des houppiers est d'obtenir le taux de détection le plus élevé possible en gardant l'erreur de comission la plus faible possible. Le choix a donc été fait de travailler sur le MNH, avec la fonction *pits fill* et de filtrer les couronnes selon leur aire. La segmentation correspondant à ces différents facteurs est ensuite comparée avec l'algorithme de référence de l'IRSTEA (Figure 11).

Figure 11 : Comparaison de SEGMA avec l'algorithme de référence de l'IRSTEA : taux de détection et erreur de comission



L'algorithme SEGMA, paramétré et modifié pour fonctionner dans les peuplements alpins donne de bons résultats par rapport l'algorithme de référence de l'IRSTEA, utilisé dans le même contexte (Figure 11). SEGMA conduit en moyenne à un meilleur taux de détection (55 % des arbres sont détectés contre 47 % pour l'IRSTEA), mais il a également une erreur de comission plus forte (7 % d'arbres sont inventés contre 5 % pour l'IRSTEA). Pour ces deux algorithmes la variabilité est très forte entre les placettes (de 10 à 90 % pour le taux de détection pour SEGMA et de 10 à 65 % pour l'IRSTEA). Ces différences sont dues en partie à la composition du peuplement : les résineux étant nettement mieux détectés que les feuillus ; ainsi qu'à la densité : les arbres étant mieux détectés dans un peuplement clair.

### Analyse détaillée sur l'échantillon de validation à l'échelle de l'arbre

Afin d'avoir plus de précision sur les résultats de cette segmentation, elle a été testée sur un échantillon de 426 arbres, équilibré en espèce, diamètre, composition et structure (voir paragraphe 2.1.3).

Les résultats, décrits dans le Tableau 14, montrent que le taux de détection global atteint 67%. Le taux de détection est très dépendant du diamètre puisque 83% des GB et 91% des TGB sont détectés, alors que 32% seulement des PB sont détectés.

Tableau 14 : Synthèse des résultats de détection des houppiers de l'algorithme SEGMA sur l'échantillon de validation à l'échelle de l'arbre

Espèce	TGB détectés (%)	GB détectés (%)	BM détectés (%)	PB détectés (%)	Total détectés (%)
<b>EPC</b>	92	82	59	42	<b>75</b>
<b>SAP</b>	91	89	64	27	<b>77</b>
<b>FEU</b>	NA	76	49	31	<b>45</b>
<b>Total</b>	<b>91</b>	<b>83</b>	<b>57</b>	<b>32</b>	<b>67</b>

Pour toutes les espèces, plus le diamètre de l'arbre est important, plus le taux de détection est élevé. Pour une catégorie de diamètre donnée, les résineux sont mieux détectés que les feuillus. En effet la dominance apicale du houppier des feuillus est moins importante et plusieurs branches peuvent être détectées comme différents apex, ce qui diminue augmente l'erreur de comission.

Tableau 15 : Détail des raisons de la non-détection des arbres par SEGMA sur l'échantillon de validation à l'échelle de l'arbre

Cause non détection	Nombre d'arbres	Proportion des arbres rejetés (%)	Proportion de la totalité des arbres (%)
Fusion	110	77	26
Manque points	6	4	1
Non appariement	27	19	6
Total	143	100	33

C'est globalement un tiers des arbres qui n'est pas correctement détecté dans cet échantillon (Tableau 15). La majorité de ces non détections est due à des fusions. Les cas de non appariement proviennent de cas limites à la périphérie des placettes. Le nuage de point de chaque arbre a été visualisé. Ceci a permis d'extraire de l'échantillon les arbres décrits par trop peu de points, qui ne permettent pas une modélisation convenable de leur houppier.

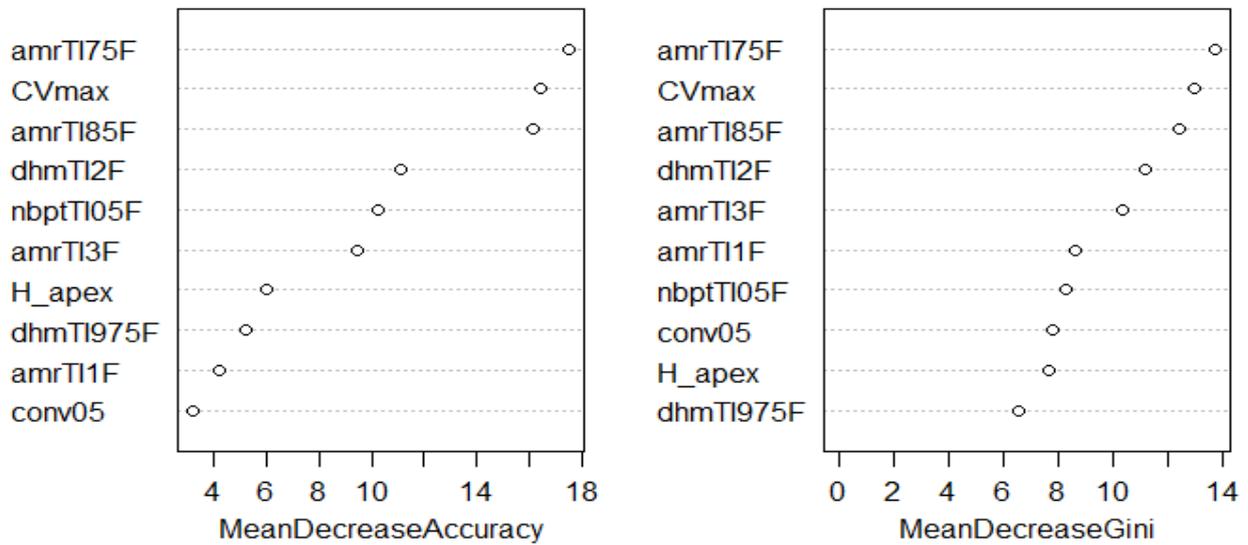
### 3.3.2 - Résultats de la modélisation de l'espèce

Deux méthodes de modélisation ont été testées pour prédire l'espèce de l'arbre à partir des métriques de forme sur le houppier : un modèle *random forest* et une régression logistique polytomique sur un lot de variables sélectionnées par *random forest*.

#### 3.3.2.1 - Analyse du modèle *random forest*

La procédure de sélection des variables VSURF appliquée sur les 150 arbres de calibration abouti à un modèle de prédiction parcimonieux en sélectionnant 10 variables explicatives parmi un jeu de 89 variables (Figure 12). Les métriques sont détaillées en annexe 11.

Figure 12 : Importance explicative selon random forest pour les 10 variables sélectionnées par la procédure VSURF



Il est rassurant de voir que la procédure de sélection aboutie au choix de prédicteurs appartenant à 5 des 6 différentes familles de métriques (voir paragraphe 2.3.2.1).

La matrice des corrélations montre que parmi les variables sélectionnées, certaines sont très corrélées entre elles avec un coefficient de Pearson parfois supérieur à 90%. Cependant la corrélation des variables a un impact limité sur la classification par *random forest* (Archer and Kimes, 2008).

Le taux de bonne classification est de 66% sur les 150 arbres de calibration et de 64 % sur les 135 arbres de validation. Le Tableau 16 présente la matrice de confusion sur l'échantillon de calibration.

Tableau 16 : Matrice de confusion de la prédiction de l'espèce avec le modèle random forest sur l'échantillon de calibration

	EPC prédit	SAP prédit	FEU prédit	Erreur (%)
EPC mesuré	32	4	14	36
SAP mesuré	4	35	11	30
FEU mesuré	11	7	32	36

### 3.3.2.2 - Analyse du modèle logistique polytomique

Les variables explicatives les plus représentatives de chaque famille de métriques (20 métriques au total environ) ont été sélectionnées suite à plusieurs procédures *random forest* par famille de variables. Seules les variables significatives dans le modèle logistique polytomique multinomial ont été conservées.

Le modèle (1) prédit deux logits en fonction du coefficient de variation des hauteurs dans le MNH (CVmax), de l'angle moyen à l'apex des points first au-dessus du 75<sup>e</sup> percentile de hauteur en radians (amrTI75F), et du nombre de points first au-dessus du 975<sup>e</sup> percentile de hauteur (nbpt975F) selon les équations suivantes :

- $Logit_1 = a_1 \times CVmax + b_1 \times amrTI75F + c_1 \times nbpt975F + Erreur_1()$  (1)
- $Logit_2 = a_2 \times CVmax + b_2 \times amrTI75F + c_2 \times nbpt975F + Erreur_2()$  (1)

Le logit 1 correspond à la séparation épicéa - sapin. Un coefficient négatif augmente la probabilité de prédire un sapin et un coefficient positif augmente la probabilité de prédire un épicéa.

Le logit 2 correspond à la séparation feuillu - sapin. Un coefficient négatif fait tendre vers le sapin et un positif vers le feuillu.

Ce modèle est significatif dans la mesure où la déviance résiduelle est de 222, soit une réduction de 33% par rapport à la déviance du modèle nul (Figure 13). Le taux de bonne classification atteint 66% avec un kappa de Fleiss de 0,49.

La variable nbptTI975F est significative pour distinguer les sapins des épicéas ( $p=0,01$ ) et les sapins des feuillus ( $p=0,004$ ). CVmax n'est significatif que pour séparer les sapins des épicéas ( $p=0,0007$ ) et amrTI75F uniquement pour dissocier les sapins des feuillus ( $p<0,0001$ ).

Figure 13 : coefficients du modèle logistique polytomique de prédiction de l'espèce sur l'échantillon de calibration

```
vglm(formula = Code_ess2 ~ CVmax + amrTI75F + nbptTI975F, family = multinomial(),
      data = allo_data_reg)
```

Pearson residuals:

	Min	1Q	Median	3Q	Max
log(mu[,1]/mu[,3])	-2.346	-0.5863	-0.07024	0.6003	5.066
log(mu[,2]/mu[,3])	-10.434	-0.4814	-0.08088	0.3259	3.625

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	p value	Pr(> p )
(Intercept):1	-0.78030	1.42505	-0.548	0.583995
(Intercept):2	-5.67087	1.44809	-3.916	9.00e-05 ***
CVmax:1	20.89510	6.17218	3.385	0.000711 ***
CVmax:2	-6.16942	6.62913	-0.931	0.352032
amrTI75F:1	-2.95854	2.91238	-1.016	0.309701
amrTI75F:2	14.17287	2.69284	5.263	1.42e-07 ***
nbptTI975F:1	-0.13775	0.05381	-2.560	0.010472 *
nbptTI975F:2	-0.10829	0.03724	-2.908	0.003634 **

---  
Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual deviance: 221.7834 on 292 degrees of freedom

Log-likelihood: -110.8917 on 292 degrees of freedom

**Analyse de CVmax.** L'épicéa se distingue du sapin par une forte variabilité verticale du nuage de points (conséquence de la plus grande pénétrabilité du houppier). Le feuillu a quant à lui une variabilité plus faible dans la distribution des hauteurs (ceci car le vol a été réalisé en feuilles).

**Analyse de amrTI75F.** L'épicéa se distingue du sapin par un angle moyen à l'apex plus faible dans le quart supérieur du houppier (conséquence de sa cime plus pointue). Le feuillu se caractérise par un angle encore plus important que celui du sapin (conséquence de sa cime aplatie).

**Analyse de nbptTI975F.** L'épicéa se distingue du sapin par un nombre moins important de points au sommet de sa cime (conséquence de l'organisation très verticale des branches à la cime par rapport au sapin plus étalé). Le feuillu se caractérise par un nombre moins important de points au sommet de sa cime que le sapin (conséquence de (des) branche(s) qui dépassent du houppier et captent peu de points).

Tableau 17 : Matrice de confusion de la prédiction de l'espèce avec le modèle logistique polytomique sur l'échantillon de calibration

	EPC prédit	SAP prédit	FEU prédit	Erreur (%)
EPC mesuré	34	10	6	32
SAP mesuré	15	28	7	44
FEU mesuré	5	8	37	26

Les erreurs de détection varient selon les espèces (Tableau 17). Cependant comme le jeu de calibration est restreint (50 individus par espèce), le poids de chaque individu est important et ces différences peuvent donc ne pas être significatives.

L'application du modèle sur le jeu de validation montre un taux de bonne détection de 69 %. L'épicéa est correctement prédit à 69 % et le sapin à 61 %. Le nombre de feuillus dans cet échantillon n'est pas suffisant pour conclure.

L'analyse de sensibilité du modèle montre que la probabilité de détection d'un arbre est influencée significativement par son diamètre ( $p = 0,02$ ) (test de Student sur les résidus du modèle) : plus le diamètre est élevé plus la probabilité de détection est forte (conséquence d'un nuage de points plus grand et plus visible porteur de meilleures informations). La densité de tiges a un léger impact ( $p = 0,08$ ), qui pourrait être un effet indirect du diamètre. En revanche ni le site, ni la densité de points, ni la composition, ni la structure du peuplement ont un impact significatif.

**Ce modèle permet de comprendre le rôle de chacune des variables et donne de bons résultats aux tests de sensibilité. Il est donc choisi pour être appliqué sur les sites d'étude.**

### 3.3.3 - Résultats de la modélisation de la hauteur

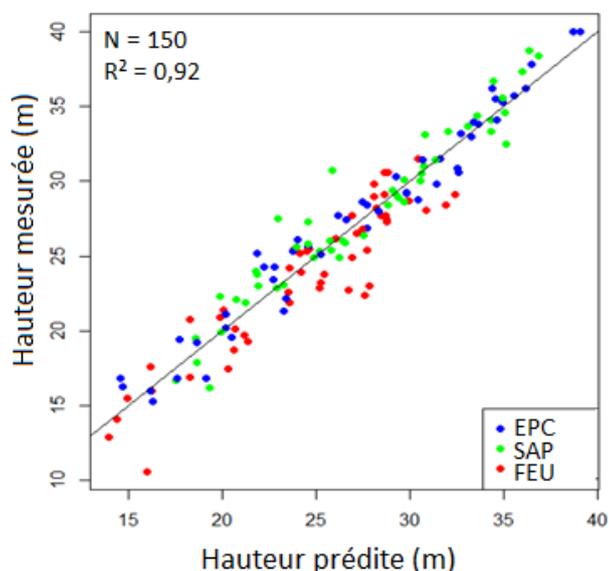
L'analyse bibliographique indique que le A-LIDAR sous-estime généralement la hauteur des arbres, et que la pente a un effet important pour la correction de cette hauteur. Un modèle linéaire a donc été établi sur l'échantillon de calibration de 150 arbres. Il relie la hauteur mesurée sur le terrain ( $H_{tot}$ ) à la hauteur LIDAR mesurée par la différence l'altitude entre l'apex et le MNT ( $H_{apex}$ ), corrigée de l'effet de la pente ( $Pente_{locP}$ ), selon la formule du modèle (2).

Le modèle (2) :  $H_{tot} = a + b \times H_{apex} + c * Pente_{locP} + Erreur()$  (2).

Les valeurs des différents coefficients sont disponibles en annexe 12.

La Figure 14 montre une très bonne relation entre la hauteur mesurée et la hauteur prédite par le modèle (2). Tous les paramètres sont nettement significatifs ( $p < 0,0001$  au test de Student) et le coefficient de détermination est de 0,92. La moyenne quadratique des erreurs est de 1,7 m sur l'échantillon de calibration et atteint 1,9 m sur l'échantillon de validation.

Figure 14 : Résultats du modèle de prédiction de la hauteur sur l'échantillon de calibration



Sur l'échantillon de calibration, la pente locale a tendance à diminuer la hauteur de l'arbre issue du LIDAR pour se rapprocher de la hauteur mesurée. Cela s'explique par des houppiers qui ont tendance à s'incliner vers l'aval et dont la différence d'altitude de l'apex par rapport au MNT est donc plus importante que la différence par rapport à la base du tronc. La réduction est de l'ordre de 5 cm par pourcent de pente (voir annexe 12). Les pentes locales de montagne peuvent atteindre facilement des valeurs de 50%, ce qui implique une réduction de la hauteur de 2,5 m.

L'analyse visuelle des résidus ne montre pas de tendance particulière. Cependant l'analyse de sensibilité des résidus du modèle montre un effet très significatif de l'espèce et également indirectement de la composition ( $p < 0,0001$  au test de Fischer).

En effet les feuillus ont une tendance beaucoup plus forte à décaler leur apex vers l'aval en zone de forte pente pour capter de la lumière contrairement aux résineux qui restent plus verticaux. Il y a donc une surestimation de la hauteur des feuillus par le A-LIDAR.

L'analyse de sensibilité des effets annexes ne montre aucun effet significatif du site, du type de peuplement, de la densité de tiges ou de la densité de points.

### 3.3.4 - Résultats de la modélisation du diamètre

Deux modèles ont été analysés pour prédire le diamètre. Le premier est un modèle allométrique qui correspond au modèle inverse de la relation hyperbolique reliant la hauteur au diamètre (Deleuze et al., 1996). Le deuxième est un modèle linéaire additif empirique utilisant trois variables issues d'une procédure de sélection de variables *Vsurf* à partir de *random forest*.

#### 3.3.4.1 – Analyse du modèle hyperbolique

Le modèle étudié prédit le diamètre (D) en fonction de la hauteur prédite (Hpred) selon l'équation suivante :

$$\text{Modèle (3)} : D = a \times (H_{pred} - 1,3) - m \div (H_{pred} - H_{max}) + \text{Erreur}() \quad (3)$$

$H_{max}$  est l'asymptote du modèle (valeur proche de la hauteur dominante des arbres),  $a$  la pente à l'origine de la courbe (varie avec l'âge de l'arbre) et  $m$  le paramètre de forme de la courbe (dépend de l'espèce).

L'ajustement a été réalisé avec le logiciel R (R Core Team, 2016), les résultats sont disponibles en annexe 13.

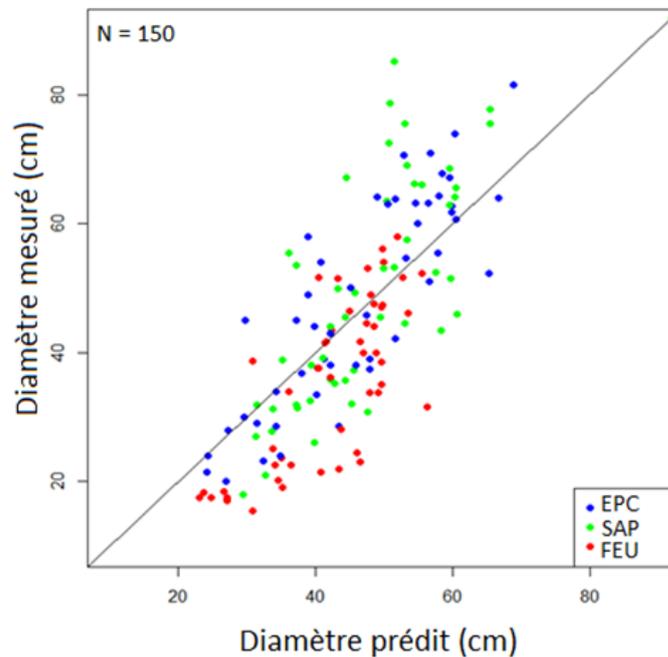
La hauteur maximale et la pente à l'origine sont fortement significatives selon le test de Student, malgré la variabilité des âges et des hauteurs dans les peuplements majoritairement irréguliers étudiés ici.

Le paramètre de forme n'est pas significatif selon le test de Student. Cela s'explique vraisemblablement par le fait que les feuillus ont un coefficient de forme différent des résineux, et qu'il est donc difficile de trouver un paramètre qui convienne pour les deux populations. Un modèle spécifique à chaque espèce aurait pu être envisagé pour limiter cet impact, cependant il serait tributaire de l'erreur de la prédiction de l'espèce.

La moyenne quadratique des erreurs est relativement élevée pour ce modèle à 10,9 cm sur l'échantillon de calibration et de 11,8 cm sur le jeu de validation.

La Figure 15 montre que ce modèle pose problème, avec systématiquement une sous-estimation des petits diamètres et une surestimation des gros diamètres.

Figure 15 : résultats de la prédiction du diamètre avec le modèle allométrique sur l'échantillon de calibration



L'analyse des résidus de ce modèle montre un effet très significatif de l'espèce et de la densité de tiges ( $p < 0,0001$  au test de Fischer). En revanche il n'y a pas d'effet significatif de la composition ou du type de peuplement.

### 3.3.4.2 - Analyse du modèle linéaire additif

Les variables explicatives les plus représentatives de chaque famille de métriques ont été sélectionnées par *random forest*. Seulement les trois variables fortement significatives dans le modèle linéaire ont été conservées.

Ce modèle prédit le diamètre (Diam) en fonction de la pénétrabilité dans les 5 premiers mètres du houppier (Pen5F), de l'aire de la couronne (CrownArea) et de la hauteur prédite (Hpred) selon l'équation suivante :

$$\text{Modèle (4) : } \text{Diam} = a \times \text{Pen5F} + b \times \text{CrownArea} + c \times \text{Hpred} + \text{Erreur}() \quad (4) ;$$

Les performances du modèle sont relativement élevées avec une moyenne quadratique des erreurs de 8,9 cm sur l'échantillon de calibration et 8,8 cm sur l'échantillon de validation. Cependant cette erreur ne présente pas de biais.

Les paramètres coefficients du modèle linéaire additif sont calculés dans le logiciel R (R Core Team, 2016 (Figure 16).

Figure 16 : valeurs des coefficients du modèle linéaire de prédiction du diamètre sur l'échantillon de calibration

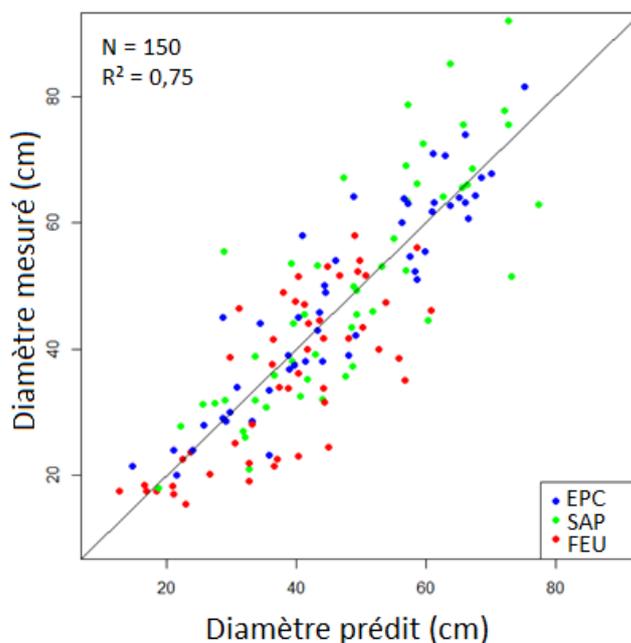
Coefficients:	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	6.22432	5.15521	1.207	0.229
Pen5F	-17.42138	3.81224	-4.570	1.03e-05 ***
CrownArea	0.26012	0.05976	4.353	2.51e-05 ***

Hpred 1.52678 0.16312 9.360 < 2e-16 \*\*\*  
 ---  
 Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Toutes les variables du modèle sont fortement significatives selon un test de Student. Les tests VIF sont respectivement égaux à 1,7, 1,9 et 1,7. Ces trois variables ne sont donc pas fortement corrélées entre elles.

Plus l'arbre est haut et plus l'aire de sa couronne est grande, plus son diamètre est important. La pénétrabilité des 5 premiers mètres témoigne de la densité du houppier : plus la pénétrabilité est forte (et moins le houppier intercepte de lumière), plus le diamètre est faible.

Figure 17 : Résultats de la prédiction du diamètre avec le modèle linéaire additif sur l'échantillon de calibration



L'analyse des résidus (Figure 17) montre un léger effet de l'espèce : le hêtre a un diamètre plus faible que les résineux, toutes choses étant égales par ailleurs.

L'analyse des tendances dans les résidus montre un effet significatif de l'espèce ( $p = 0,01$  au test de Fischer) et très significatif de la densité de tiges ( $p = 0,004$ ). En revanche, il n'y a pas d'effet significatif constaté pour le site, la densité de points, la composition ou la structure du peuplement.

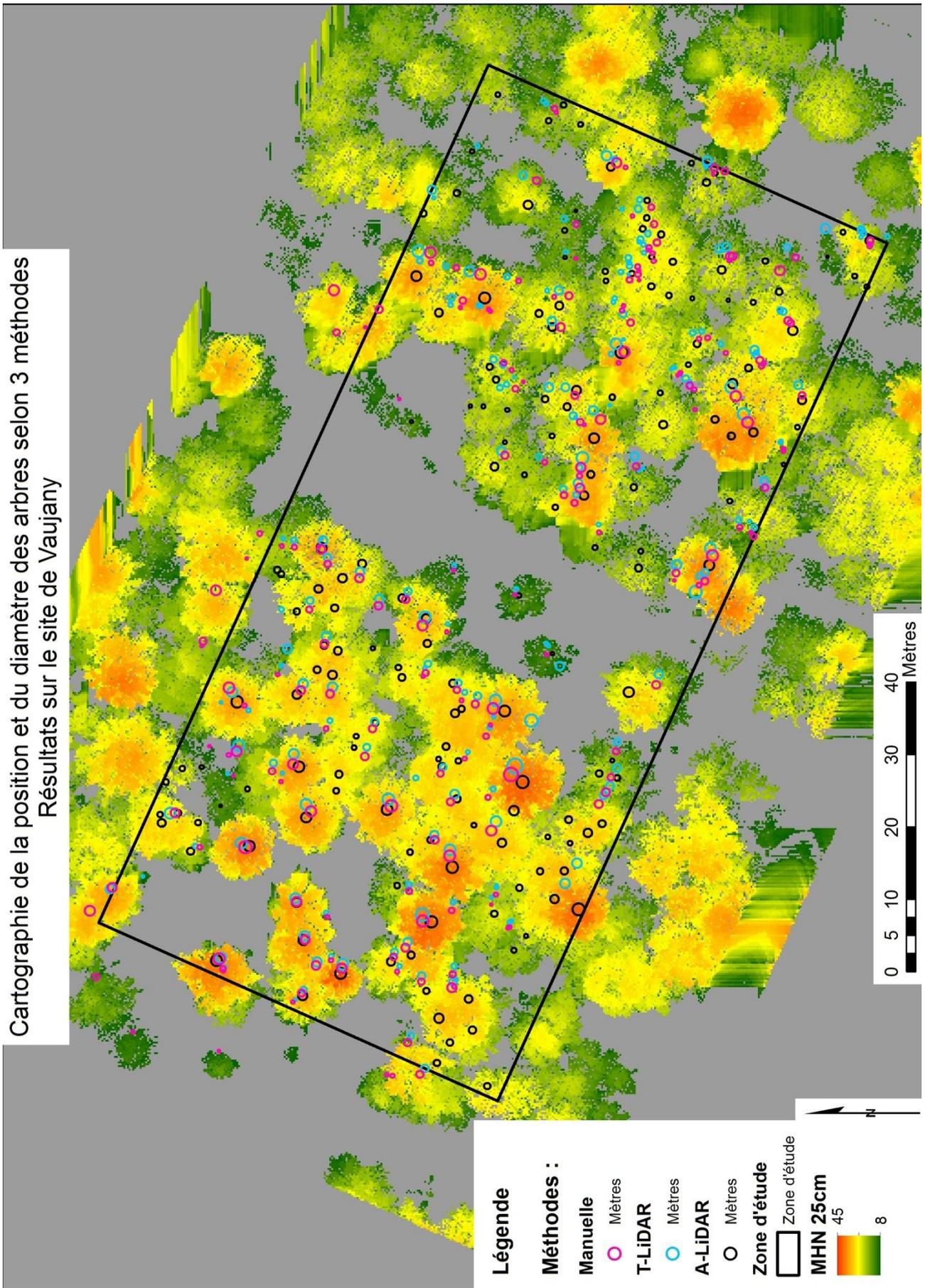
**Le modèle allométrique est semblé biaisé et très sensible à l'espèce et à la densité de tiges. Le modèle linéaire additif est donc sélectionné pour prédire le diamètre sur les sites d'étude.**

### 3.4 - Comparaison entre les 3 méthodes de cartographie

#### 3.4.1 - Appariement des arbres entre les 3 cartographies

Il est possible de comparer visuellement les différentes cartographies des arbres obtenues dans un logiciel cartographique (Figure 18). Cela permet de réaliser l'affiliation des arbres et de constater les décalages entre les méthodes.

Figure 18 : Représentation graphique des 3 méthodes de cartographie sur le site de Vaujany



### 3.4.2 - Comparaison globale des 3 cartographies

Une fois le travail fastidieux d'appariement des arbres réalisé (voir paragraphe 2.4.1.3), il est possible de comparer les cartographies. Le nombre d'arbres détectés au T-LIDAR est identique à celui des arbres inventoriés manuellement (hors cas limites, souches et arbres morts). En revanche il manque 14 arbres suite à la détection automatique à l'aide de SEGMA sur le A-LIDAR (Tableau 18). Ces différences sont difficilement interprétables car les houppiers peuvent être découpés ou fusionnés.

Tableau 18 : Synthèse du nombre d'arbres détecté total et hors cas limites et morts pour les 3 méthodes de cartographie sur le site de Vaujany

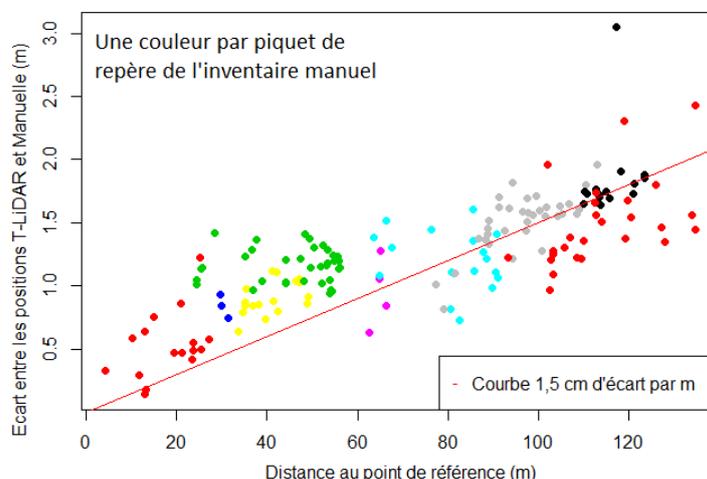
Méthode	Nombre d'arbres détectés	Nombre d'arbres hors cas limites et morts
Manuelle	200	168
T-LIDAR	207	168
A-LIDAR	173	154

### 3.4.3 - Comparaison quantitative des cartographies manuelle et T-LIDAR

Cette comparaison s'effectue sur les 168 arbres communs aux deux cartographies. Pour la position, la référence prise est le T-LIDAR puisque l'erreur de calage des 40 scans est de l'ordre de 1 cm.

La moyenne quadratique des écarts en distance horizontale entre les deux méthodes est de 1,3 m. Plus l'arbre est éloigné du point commun aux trois méthodes (situé dans le coin Sud-Ouest de la palcette) plus les écarts sont importants (Figure 19).

Figure 19 : Ecarts de distance entre les positions des cartographies manuelle et T-LIDAR en fonction de la distance au point de référence des cartographies

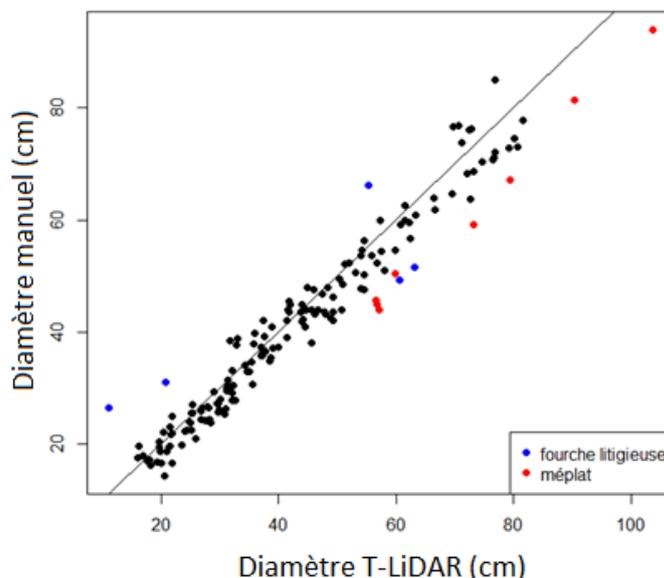


La tendance générale est une augmentation de l'écart en fonction de la distance au point de référence, avec un décalage d'environ 1,5 cm par mètre d'éloignement au point de référence (Figure 19). Cependant le décalage n'est pas linéaire. Cela est dû à la méthode manuelle de positionnement des arbres : les arbres sont positionnés par rapport à des piquets qui eux-mêmes sont positionnés entre eux. S'il y a un décalage pour un piquet, c'est alors tout le groupe d'arbres qui est décalé.

Pour l'espèce sept arbres différents, soit 4 % d'erreur. Un épicéa a été prédit comme un sapin par le T-LIDAR (conséquence d'une erreur de marquage avec les sphères), un feuillu et un sapin ont été intervertis (conséquence d'une mauvaise assignation de l'espèce due à des tiges collées), cinq sapins sont prédits comme des feuillus par le T-LIDAR (conséquence d'oublis de marquage de l'espèce avec les sphères).

La prédiction du diamètre par T-LIDAR est correcte : la moyenne quadratique des écarts sur le diamètre est de 4,7 cm, avec une légère surestimation des arbres de gros diamètre (Figure 20). Cette valeur légèrement élevée est en partie due à certains arbres ayant des écarts de plus de 10 cm. Ces arbres ont été vérifiés dans le nuage T-LIDAR. Dans la plupart des cas, l'erreur est due à un litige sur l'évaluation du diamètre par rapport à une fourche ou bien à des arbres ayant un méplat de plus de 10% (c'est-à-dire ayant au moins une différence de 10% entre le diamètre maximal et le diamètre minimal à 1,3 m), pour lesquels le diamètre est surestimé. La moyenne quadratique des écarts est de 3,6 cm si l'on retire de l'échantillon les arbres fourchus et méplats.

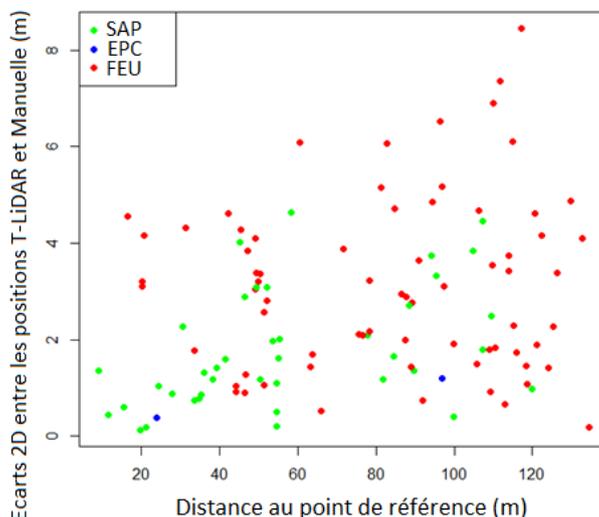
Figure 20 : Comparaison des diamètres mesurés manuellement et au T-LIDAR avec représentation des arbres fourchus et méplat



### 3.4.4 - Comparaison quantitative des cartographies manuelle et A-LIDAR

La comparaison est réalisée uniquement sur les 113 arbres communs aux deux méthodes et détectés exactement ou de manière satisfaisante par le A-LIDAR (voir paragraphe 2.4.1.3). La moyenne quadratique des écarts en distance horizontale entre les deux méthodes est de 3,1 m, avec des écarts pouvant atteindre 6 à 8 m. Les écarts de position ne dépendent pas de la distance au point de référence (Figure 21).

Figure 21 : Ecart de distance entre les positions des cartographies manuelle et A-LIDAR en fonction de la distance au point de référence des cartographies

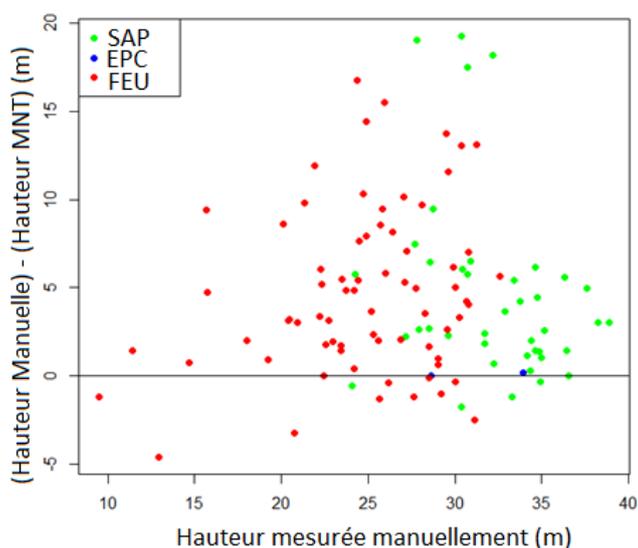


La distance par rapport à la cartographie manuelle dépend surtout de l'espèce. En effet les feuillus ont tendance à déporter leur houppier, et donc leur apex, vers l'aval afin d'intercepter plus de lumière. C'est le fait de comparer la position de l'apex avec celle de la base du tronc qui explique majoritairement ces décalages allant jusqu'à plus de 6 m. Ce décalage important, couplé aux incertitudes de fusion ou de découpage des couronnes rendent l'appariement automatique selon la méthode de l'IRSTEA (Monnet et al., 2014) impossible.

La mise en correspondance à partir des apex directement dans le nuage de points décrite dans le paragraphe 2.1.3, serait plus rigoureuse. Cependant cette méthode reste difficile et très fastidieuse à cette échelle compte tenu des nombreux litiges et des déports de houppiers de feuillus. Cette opération n'a pas pu être réalisée faute de temps disponible.

Pour déceler les éventuels mauvais appariements, la hauteur semble plus pertinente que le diamètre. En effet le diamètre dépend à la fois de la hauteur et de la surface de la couronne. Or dans le cas de fusions ou de découpages un biais supplémentaire peut entacher le diamètre.

Figure 22 : Comparaison des hauteurs mesurées manuellement ou par A-LIDAR sur le site de Vaujany



La hauteur issue du A-LIDAR est surestimée de plus de 5 m dans un nombre important de cas (Figure 22). La moyenne quadratique des écarts est de 7,6 m. Lorsque l'on corrige les hauteurs à l'aide du modèle (2) elle diminue à 5,9 m. Cette valeur encore très élevée laisse penser qu'il s'agit certainement de problèmes d'appariement et non d'une mauvaise estimation de la hauteur par le A-LIDAR.

Après vérification de quelques arbres dans le nuage de points 3D, tous les arbres ayant un écart entre la hauteur corrigée et la hauteur mesurée supérieur à 5 m sont retirés de l'échantillon, considérant que ces arbres ne pouvaient être bien appariés. L'échantillon est alors réduit de 113 à 85 individus. La moyenne quadratique des écarts entre la hauteur corrigée à l'aide du modèle (2) et la hauteur mesurée est cette fois de 3,4 m, ce qui reste encore élevé.

Etant donné toutes ces difficultés pour appairer le A-LIDAR et l'inventaire manuel, les résultats de la comparaison sur l'essence et sur le diamètre sont à analyser et à utiliser avec précaution.

Lorsque l'on applique le modèle logistique polytomique sur les 85 arbres de Vaujany, le taux de bonne prédiction atteint 57%, avec un kappa de 0,47.

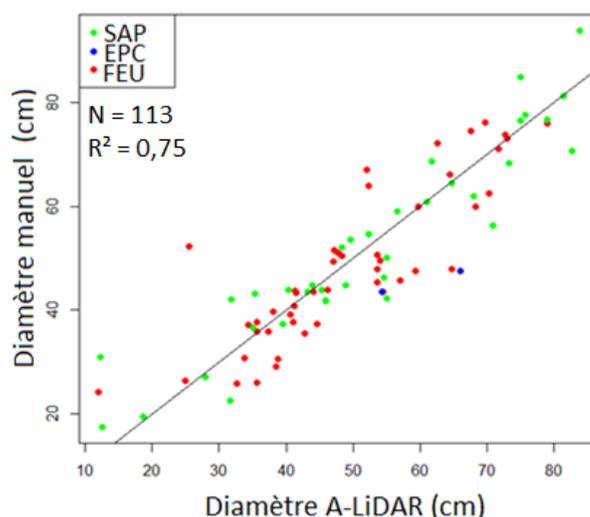
Tableau 19 : matrice de confusion de la prédiction de l'espèce au A-LIDAR sur le site de Vaujany

	EPC prédit	SAP prédit	FEU prédit	Erreur (%)
EPC mesuré	1	1	0	50
SAP mesuré	3	28	3	18
FEU mesuré	15	14	20	59

Il n'y a que deux épicéas dans cette échantillon, l'erreur de prédiction sur cette espèce n'a donc pas de sens (Tableau 19). Les sapins sont bien prédits avec une erreur de 18 %. Les feuillus sont mal prédits avec une erreur de 59 %. Cette erreur pourrait être expliquée par la proportion importante de feuillus dans ce peuplement (63 %), qui n'est pas représentée dans l'échantillon de calibration.

L'application du modèle linéaire de prédiction du diamètre sur les 85 arbres de Vaujany conduit à une moyenne quadratique des écarts sur le diamètre entre les deux méthodes de 9,4 cm, avec un coefficient de corrélation de 75 % (Figure 23).

Figure 23 : Comparaison des diamètres mesurés manuellement et au A-LIDAR sur le site de Vaujany



Ce modèle ne présente pas de différence importante selon les espèces. Il y a une légère surestimation du diamètre, due aux houppiers fusionnés qui augmentent artificiellement la surface de la couronne, et donc le diamètre prédit. Certains arbres ont une prédiction de leur diamètre variant de 20 cm par rapport à la mesure terrain. Il s'agit certainement de mauvais appariements qui n'ont pas encore été filtrés avec des cas de fusion (augmentation du diamètre) ou de découpage (diminution du diamètre) du houppier.

### 3.4.5 - Comparaison générale des 3 modèles

La Figure 24 résume la distribution du peuplement selon les trois méthodes par catégorie de diamètre et par espèce.

Figure 24 : Histogramme du nombre d'arbre par espèce et par classe de diamètre selon les 3 méthodes de cartographie sur le site de Vaujany

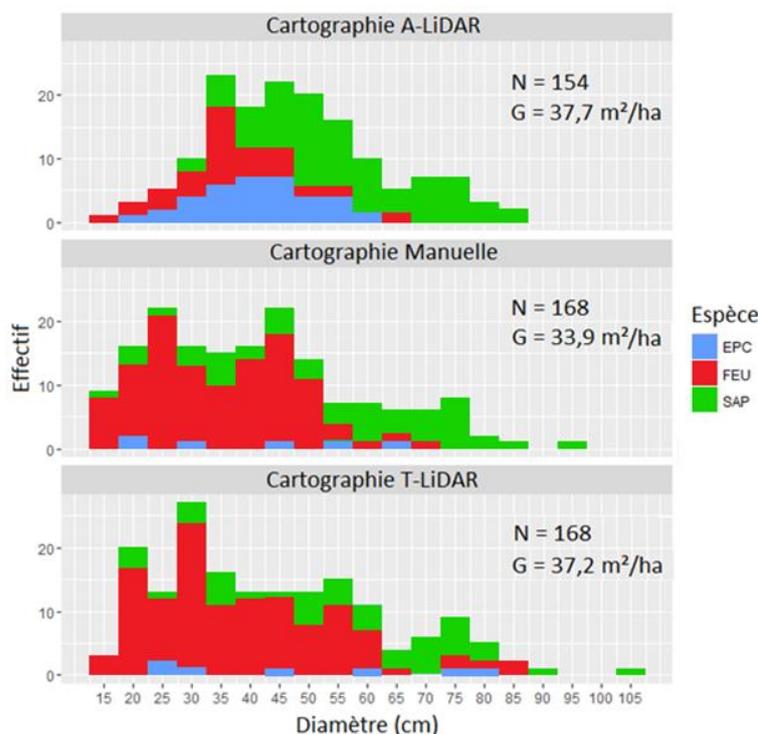


Tableau 20 : ventilation de la surface terrière par espèce pour les 3 méthodes de cartographie sur le site de Vaujany

	G Feuillu (m <sup>2</sup> /ha)	G Sapin (m <sup>2</sup> /ha)	G Epicéa (m <sup>2</sup> /ha)	G Total (m <sup>2</sup> /ha)	Erreur relative (%)
A-LIDAR	5,5	25,9	6,4	37,7	11
T-LIDAR	18,1	17,1	2,0	37,2	10
Manuelle	15,1	17,7	1,1	33,9	0

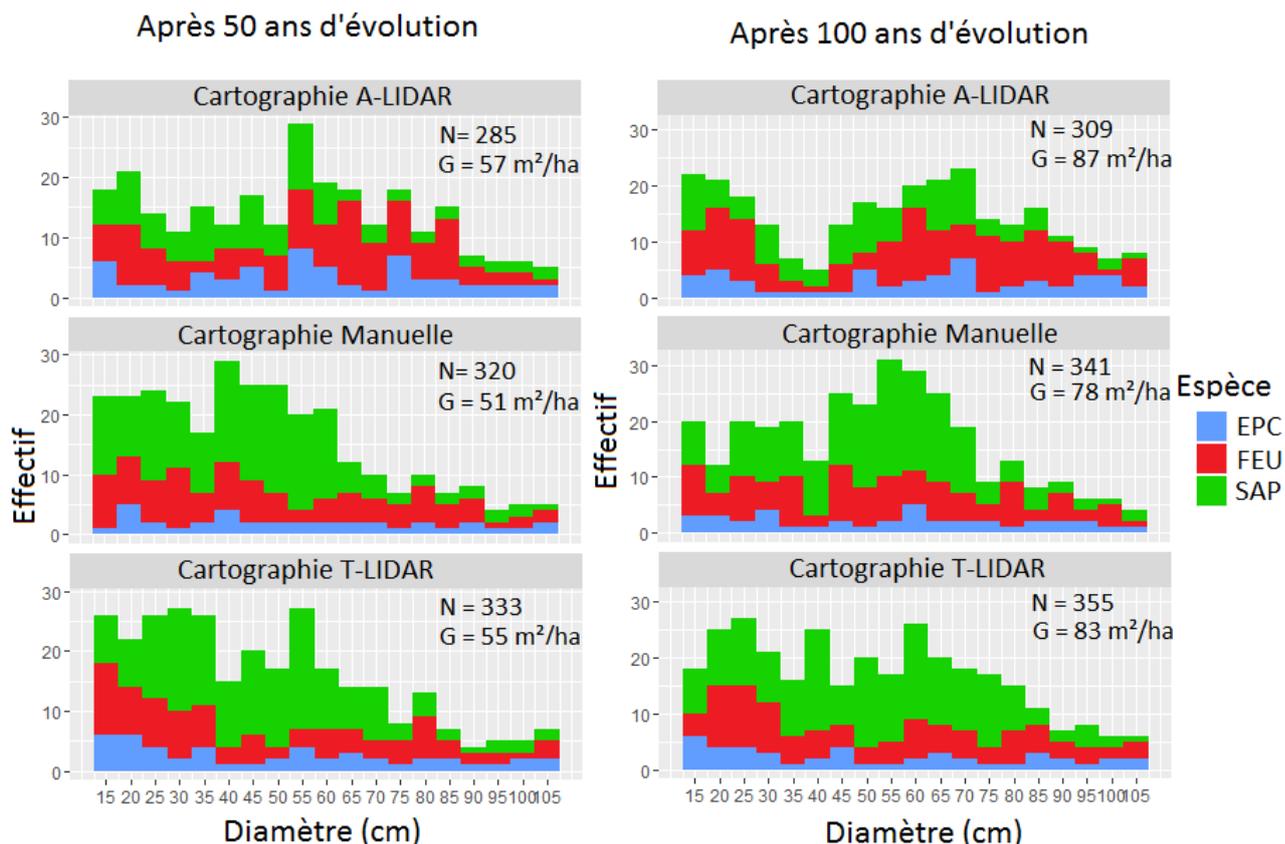
A l'échelle du peuplement, les cartographies manuelle et T-LIDAR sont très proches (Tableau 20). La surestimation de la surface terrière est due en partie à l'effet méplat des résineux de gros diamètre. Cette surestimation se reporte sur les feuillus du fait des erreurs d'espèce prédisant un feuillu pour un résineux.

Les cartographies manuelle et A-LIDAR sont aussi relativement proches. Il y a une sous-estimation des arbres ayant un diamètre inférieur à 30 cm (conséquence d'une mauvaise détection des arbres dominés du fait du manque de visibilité). Les bois moyens et les gros bois sont quant à eux surestimés. Les couronnes de ces derniers sont fusionnées avec les arbres dominés qui ne sont pas détectés ce qui tend à augmenter leur diamètre. Au niveau des espèces la mauvaise prédiction des feuillus augmente artificiellement la proportion de sapin et d'épicéa.

### 3.5 - Résultats de la comparaison après simulations dans SAMSARA

Une même comparaison à l'échelle du peuplement peut être réalisée à partir des résultats des simulations de SAMSARA après 50 ou 100 ans d'évolution libre et avec une simulation automatique de la régénération (arbres ayant un diamètre inférieur à 17,5 cm) (Figure 25).

Figure 25 : Histogrammes du nombre d'arbre par espèce et par classe de diamètre selon les 3 méthodes de cartographie sur le site de Vaujany après 50 et 100 ans de simulation



Après 50 ou 100 ans de simulation de croissance en évolution libre, les variations de surface terrière totale entre les inventaires A-LiDAR et T-LiDAR par rapport à la cartographie manuelle sont respectivement de +6 et +11 %, et +8 et +6 %. Les résultats sont du même ordre ce qui concerne la densité de tiges.

En termes de structure des peuplements, les histogrammes (Figure 25), montrent pour les peuplements décrits au A-LiDAR un déficit marqué des bois moyens après 100 ans d'évolution (temps nécessaire pour se rendre compte de l'impact de la non détection des petits arbres dominés). Il s'explique en grande partie par les mauvaises détections initiales des arbres dominés de petit diamètre. Le T-LiDAR présente quant à lui après 100 ans d'évolution un étalement plus marqué dans la distribution des gros bois, ce qui est cohérent avec l'étalement plus important constaté initialement.

En termes de composition, la méthode A-LiDAR se différencie toujours par une proportion plus importante d'épicéa, du fait de l'erreur initiale de prédiction de l'espèce.

Ces résultats sont à interpréter avec prudence dans la mesure où SAMSARA n'est pas calibré en évolution libre sur des durées de simulation de 100 ans.

### **3.6 - Résultats de l'application de SEGMA sur de grandes surfaces**

Afin d'évaluer la capacité de SEGMA à traiter un versant complet d'un massif forestier, une chaîne de traitement a été mise au point afin de lancer la détection des couronnes sur 400 ha sur la forêt du Petit Bornand (74). Comme *CompuTree* permet un traitement en boucle, SEGMA a été adaptée pour traiter 16 dalles de 500 m de côté avec un tampon de 25 m. La segmentation a duré 18 h dont 17 h pour la création du MNH et 1 h pour la segmentation d'environ 180 000 couronnes. La segmentation a été évaluée sur quelques placettes et donne des résultats du même niveau que sur l'échantillon de calibration avec un taux de détection d'environ 70%.

SEGMA est donc applicable relativement rapidement sur ces 400 ha de forêt, ce qui permet d'envisager une cartographie et une caractérisation de grandes forêts à l'échelle de l'arbre.

## **4 – Discussion des résultats**

### **4.1 - Comparaison des différentes méthodes de cartographie**

#### **4.1.1 – Comparaison des temps de mise en œuvre**

Il est toujours difficile de comparer les temps de mise en œuvre de différentes méthodes de cartographie, y compris sur un même site. Il y a un effet opérateur important sur la vitesse de la prise des mesures. Comme les mesures n'ont pas été répétées sur le même site, il n'est pas possible de quantifier cet effet opérateur. De plus, ce sont les premiers inventaires au T-LIDAR réalisés sur de grandes surfaces. Il y a donc un effet apprentissage qui explique en partie pourquoi les inventaires sur Vaujany ou la Motte Servolex ont été plus efficaces que celui réalisé sur Thorens.

Les temps d'inventaire varient du simple au triple selon les conditions. En particulier la pente, l'état du sol et la visibilité dans le peuplement (densité du sous étage et des branches basses) influencent fortement le temps de réalisation. Seulement trois sites ont été inventoriés et cet échantillon est trop faible pour pouvoir quantifier précisément cet effet.

De plus les inventaires ne sont pas indépendants entre eux. L'inventaire au T-LIDAR nécessite de supprimer des branches de sous étage qui créent des zones d'occlusions trop importantes. Comme cet inventaire a eu lieu avant l'inventaire manuel, la visibilité a été améliorée pour l'inventaire manuel alors que le temps consacré à cette amélioration n'est comptabilisé que pour l'inventaire au T-LIDAR.

Les temps de traitement des données sont eux dépendants de la puissance de calcul des ordinateurs pour le T-LIDAR en particulier.

#### **4.1.2 – Erreur de position planimétrique et appariement des cartographies**

A dire d'expert il est considéré que l'erreur de positionnement relatif des arbres lors d'un relevé topographique classique est de l'ordre de 50 cm (E. Mermin, IRSTEA, com.pers.) à l'échelle de chaque station de mesure. Lors d'un inventaire au T-LIDAR, l'erreur de position des arbres peut être considérée comme équivalents à l'erreur de calage des scans, soit environ 1 cm sur le site de Vaujany. Or l'analyse des écarts montre des écarts souvent supérieurs à 50 cm, y compris pour les stations de mesure les plus proches du point de référence (Figure 19). Finalement, en prenant également en compte l'erreur de positionnement des stations entre elles, la moyenne quadratique des écarts de position entre les deux méthodes est de 1,3 m.

Etant donné cette erreur n'est pas suffisante pour modifier l'organisation relative des arbres entre eux et que le même nombre d'arbres détectés manuellement et par le T-LIDAR est le même, l'appariement des arbres entre ces deux méthodes n'est pas sujet à erreurs.

L'appariement entre les cartographies manuelle et A-LIDAR est nettement plus délicat. Tout d'abord il peut y avoir des fusions ou des découpages de houppiers. Cela implique que plusieurs arbres terrain peuvent correspondre à un seul arbre A-LIDAR et inversement. La non verticalité entre l'apex et le tronc vient encore compliquer l'appariement. Pour les feuillus qui ont tendance à décaler leur cime vers l'aval pour capter plus de lumière, l'apex peut être décalé de 6 à 8 m par rapport à la référence du tronc à 1,3 m du sol. Toutes ces difficultés conduisent à une moyenne quadratique des différences sur la position de 7,6 m. Dans ce type de peuplement, le recours à un algorithme d'appariement automatique serait contestable du fait des forts décalages entre le tronc et l'apex, en particulier pour les feuillus.

Seul un appariement entre chaque arbre terrain et chaque apex dans le nuage de points 3D permettrait d'évaluer rigoureusement les erreurs planimétriques sur la position. Mais cette méthode est longue et fastidieuse, et difficilement réalisable à si grande échelle. C'est pourquoi il a été choisi arbitrairement d'évaluer ces erreurs sur les 85 arbres repérés comme étant bien détectés, en particulier car leur hauteur est cohérente avec celle mesurée sur le terrain.

## **4.2 - Discussion des résultats de la cartographie des arbres au T-LIDAR**

### **4.2.1 – Résultats sur l'espèce et le diamètre**

L'espèce est détectée avec précision par le T-LIDAR en utilisant le système de codage des espèces, avec une erreur de 4 %. Ce système de marquage permet de dissocier des espèces proches comme le sapin et l'épicéa, ce qu'il n'est pas possible de faire à partir de l'écorce pour l'instant (Othmani, 2014).

La moyenne quadratique des écarts est de 3,4 cm sur le diamètre, ce qui est cohérent avec d'autres études (Bauwens et al., 2016; Othmani et al., 2011), mais pourrait être amélioré.

### **4.2.2 - Perspectives d'amélioration de la méthode**

#### **4.2.2.1 - Améliorations sur la phase d'inventaire**

Le protocole proposé pour inventorier une zone de l'ordre d'un hectare au T-LIDAR donne des résultats précis mais est long à mettre en œuvre et demande de transporter beaucoup de matériel (le protocole complet est en annexe 6). Il serait possible de se passer des deux valises de transport des sphères de calage FARO en les remplaçant, sans réellement perdre de précision, par les petites sphères en polystyrène de 8 cm de diamètre. Un essai a été réalisé sur une petite zone test et donne de bons résultats : les tensions de calage sont du même ordre que pour le protocole actuel et il n'y a pas de décalage visible dans le nuage de points.

Cette simplification du protocole semble donc tout à fait envisageable, après une vérification à l'échelle d'un site complet. Il faut cependant être plus attentif au moment du positionnement des sphères car ces petites sphères sont visibles à 15 m de distance maximum, et il faut donc vérifier pour chaque sphère qu'elle satisfasse bien les hypothèses de visibilité (30 points par sphère environ).

Il serait également intéressant d'évaluer les performances (en temps et en précision), d'un scanner mobile de type ZEB 1, qui semble plus souple d'utilisation (Bauwens et al., 2016). Cependant les phases de repérage, de préparation et de marquage des arbres restent incompressibles. Il faudrait également plus de matériel car, avec cette technique, l'espèce doit être marquée sur tous les arbres de la zone avant que le scan ne commence.

D'une manière générale ce protocole demande beaucoup de réflexion et d'attention. Le moindre déplacement d'une sphère de calage peut avoir des conséquences importantes sur la précision du calage global du nuage de points. Dans certains cas, en l'absence d'au moins 3 sphères communes de calage et si aucun repère fixe n'est réutilisable, c'est l'ensemble de la phase d'acquisition qui doit être refaite. Il paraît donc raisonnable de ne pas prévoir de journées d'inventaire trop longues pour garder un travail rigoureux et sans risque.

Le T-LIDAR est très sensible aux occlusions qui sont notamment dues au sous étage et à la régénération. Il est donc préférable de réaliser ce type d'inventaire en dehors de la saison de végétation. Si cela ne suffit pas il est nécessaire de couper le sous étage gênant la prise des mesures et si jamais celui-ci est trop dense ou qu'il n'est pas possible de le couper (cas des îlots de sénescence), alors un inventaire au T-LIDAR n'est plus envisageable.

#### **4.2.2.2 - Améliorations de la phase de traitement**

La chaîne de traitements qui permet de déterminer le diamètre et la position des arbres demande, dans son état actuel, beaucoup de temps opérateur sur des tâches répétitives. Essayer d'automatiser une plus grande partie du travail permettrait d'alléger la charge opérateur et de rendre cette cartographie plus facile à mettre en œuvre.

Deux étapes manuelles représentent la majorité du temps de traitement :

- l'étape de filtrage des sphères et de recalage des scans entre eux dans le logiciel *Scene* (7,5 h). S'il subsiste des décalages, cela perturbe voire rend impossible la suite des traitements (voir essai la Motte Servolex paragraphe 2.2.1.1). Le filtrage des sphères est également essentiel pour la reconnaissance de l'espèce : si des sphères sont oubliées ou bien inventées, cela conduit à une modification du code de l'espèce et au final à une erreur. Une détection automatique des sphères plus efficace, nécessitant moins de vérification pourrait permettre de limiter le temps opérateur ainsi que les erreurs.
- l'étape de filtrage des points parasites sur les troncs et de séparation des jumelles (12 h). Cette étape est la plus longue et la plus fastidieuse. Elle est importante car c'est la dernière étape permettant de séparer les différents brins d'une cépée s'ils sont collés. De plus le filtrage des branches est très important car il a pour objectif de limiter les erreurs de prédiction du diamètre : avec de nombreuses insertions de branches, il sera difficile d'ajuster un diamètre correct. La dernière action de cette étape consiste à sélectionner un diamètre cohérent correspondant le mieux possible au diamètre à 1,3 m. Or du fait des branches résiduelles mais surtout des occlusions sur les troncs, le diamètre ajusté à 1,3 m n'est pas nécessairement cohérent avec le diamètre réel. L'opérateur doit alors sélectionner un autre diamètre cohérent à une hauteur différente, ce qui correspond à une interprétation de l'opérateur et peut entraîner des erreurs. Une réflexion sur d'autres méthodes de filtrage automatiques plus efficaces permettrait d'alléger cette étape et également de limiter les erreurs, par exemple en sélectionnant le diamètre le plus proche de 1,3 m par rapport au sol, estimé avec le plus de points et le plus cohérent par rapports à ses voisins.

Comme détaillé dans le paragraphe 3.4.3, la méthode d'ajustement présente un biais pour les arbres méplats de gros diamètre. Ce biais correspond à l'erreur de mesure d'un diamètre toujours pris sur le plus grand axe par rapport à deux diamètres perpendiculaires. L'ajustement d'ellipses plutôt que de cercles pourrait permettre de résoudre ce problème. Cependant ce changement doit être réfléchi car il pourrait augmenter l'impact des branches qui n'ont pas été correctement filtrées sur l'estimation du diamètre.

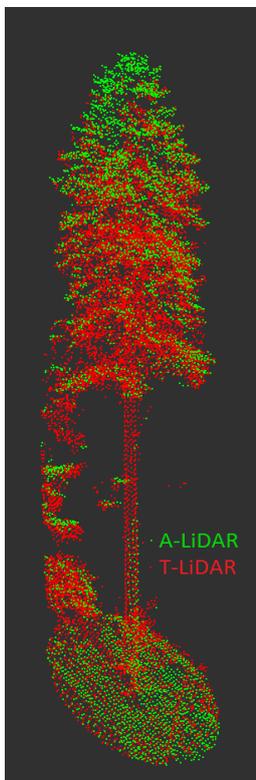
La définition de l'altitude du sol au niveau de l'arbre est importante pour l'évaluation du diamètre précisément à 1,3 m. Pour l'instant c'est l'altitude au centre du tronc qui est utilisé. Une amélioration de l'algorithme pourrait être d'utiliser l'altitude à l'amont de l'arbre, comme dans le cas des mesures terrain.

Le recalage du nuage de points T-LIDAR est, dans l'état actuel, réalisé à la main. Seulement cela nécessite d'avoir un ou plusieurs points de repère commun entre le nuage T-LIDAR et le nuage A-LIDAR. Des algorithmes automatiques fonctionnant sur la base de la répartition des points dans l'espace vont prochainement être intégrés à *CompuTree*. Cela devait permettre d'automatiser la phase de recalage des nuages et surtout de la rendre possible sans point de repère facilement visible.

L'intégration de la détection automatique des sphères dans *CompuTree* pourrait permettre d'associer directement l'espèce au diamètre en une seule phase de traitement.

#### 4.2.3 - Perspectives d'utilisation de la cartographie par T-LIDAR

Comme l'a montré l'analyse des résultats, cette méthode de cartographie peut être une alternative à la cartographie manuelle pour des dispositifs de référence. En effet elle donne un plan des arbres très précis qui permet de simuler ensuite la dynamique d'évolution des peuplements.



Cette méthode a l'intérêt de fournir une image presque complète des arbres et permet d'obtenir d'autres informations comme la forme des houppiers ou bien un MNT précis sous couvert. Les caractéristiques des houppiers, informations difficilement mesurables avec précision sur le terrain, sont potentiellement utilisables dans le nuage T-LIDAR. Ces informations n'ont pas pu être valorisées dans ce cadre de ce stage, mais ouvrent de nombreuses possibilités sur l'étude de la forme, de la branchaison, et des relations de compétition entre les arbres.

De même, les informations sur le recouvrement ou l'importance de la régénération n'ont pas pu être valorisées, faute de temps. Cette information est importante pour la dynamique des peuplements, notamment simulée via SAMSARA et reste difficile à mesurer précisément sur le terrain.

Un autre avantage de cette image est que si deux inventaires T-LIDAR sont réalisés à deux dates différentes, il paraît envisageable de recalcr les deux nuages et de pouvoir alors caractériser précisément l'évolution du peuplement entre ces deux dates.

Une fois le nuage T-LIDAR recalé sur le nuage A-LIDAR, il est possible d'avoir une image complète de l'arbre avec à la fois son pied et sa cime. Cela pourrait ouvrir la voie à d'autres études et d'autres analyses à l'échelle de l'arbre (Figure 26).

Figure 26 : Arbres visible au T-LIDAR et au A-LIDAR sur le site de Vaujany

### 4.3 - Discussion des résultats de la cartographie des arbres au A-LIDAR

#### 4.3.1 - Segmentation des houppiers

L'évaluation des performances de détection des houppiers par l'algorithme SEGMA par rapport à la bibliographie est délicate, dans la mesure où les taux de détection sont très dépendants du type de peuplement et des seuils de précomptage des tiges de référence (Eysn et al., 2015; Kaartinen et al., 2012; Koch et al., 2006). Cependant une étude (Eysn et al., 2015), permet d'avoir des résultats pour des peuplements mélangés de sapin, épicéa et hêtre de la région alpine. Les taux de détection varient de 43 à 54 % selon l'algorithme. Pour les arbres de 15 à 20 m de haut ils varient de 24 à 46 %, et pour les arbres de plus de 20 m de 66 à 82%.

Avec un taux de détection global de 67%, qui atteint 42 % pour les arbres de 15 à 20 m de haut et 81 % pour les arbres de plus de 20 m, SEGMA fait partie des algorithmes les plus performants pour détecter les houppiers dans des peuplements mélangés de sapin, épicéa et hêtre, très fréquents dans les Alpes du Nord.

La meilleure façon de comparer des algorithmes de détection est de les analyser sur le même jeu de données (Eysn et al., 2015; Kaartinen et al., 2012). C'est ce qui a été réalisé avec l'aide de l'IRSTEA sur un jeu de 29 placettes. Dans ces conditions optimales de comparaison, SEGMA se révèle en moyenne plus performant pour la détection des tiges que l'algorithme de l'IRSTEA (Monnet et al., 2010). Cependant ce dernier présente moins d'erreur de commission.

Ces résultats restent très variables avec des taux de détection et d'omission qui varient du simple au triple d'une placette à l'autre. Si les caractéristiques des peuplements expliquent vraisemblablement en partie ces différences, il n'a pas été possible de les étudier ici compte tenu du faible nombre de placettes. Face à ce résultat la notion de paramétrage optimal perd une partie de son sens. Une caractérisation préalable du peuplement, qui conduirait à une adaptation optimale des paramètres de SEGMA à l'échelle de chaque peuplement, pourrait permettre de diminuer cette variabilité et vraisemblablement d'augmenter les résultats de détection. Cependant cette modification pourrait s'avérer complexe et nécessiter en particulier un grand nombre de placettes de calibration.

Il existe également des différences selon les espèces : pour un même paramétrage les feuillus seront plus sur-segmentés du fait des différentes branches dans la partie supérieure de leur houppier (voir paragraphe 3.3.1). Cet effet est d'autant plus gênant dans la mesure où le décalage planimétrique entre la position de l'apex détecté par SEGMA et la position du tronc mesuré sur le terrain a été évalué à plus de 5 m. Ce décalage est plus fort pour les feuillus, dont le houppier est déporté vers l'aval. Ce biais induit une forte variabilité des taux de détection, d'autant plus que la pente est forte et que la proportion de feuillus est important. Les taux d'appariement fournis dans ces conditions par des algorithmes d'appariement automatiques sont donc discutables. La seule méthode permettant un appariement certain est de travailler avec l'apex des arbres dans le nuage de points 3D, ce qui a été fait pour l'échantillon de 426 arbres. Cependant cette méthode reste très longue et fastidieuse et reste sujette à certaines erreurs.

Les arbres qui ne sont pas détectés sont souvent des petits arbres dominés. Ce ne sont pas forcément ceux qui ont le meilleur avenir. Cependant les résultats des simulations avec SAMSARA (paragraphe 3.5) montrent qu'ils ont un impact significatif sur le peuplement après 100 ans d'évolution. Une approche statistique à l'échelle du peuplement pourrait permettre de prédire la distribution des arbres et peut être de combler cette absence de détection.

Le cas des houppiers fusionnés reste problématique car les modèles vont alors prédire un unique et grand arbre au lieu de deux plus modestes. Une analyse plus détaillée cette fois sur le nuage de points des arbres une fois la segmentation réalisée pourrait peut-être permettre de déceler ces cas de fusion de houppiers et de séparer à posteriori les deux arbres.

Le cas des faux positifs, c'est-à-dire de houppiers segmentés qui ne correspondent à aucun arbre est aussi problématique. Là encore une approche au niveau du nuage de points, pourrait permettre de détecter ces houppiers qui n'ont vraisemblablement pas la même forme qu'un houppier complet. Il serait alors possible de les réaffecter à l'un des arbres mitoyens.

### 4.3.2 - Modèle de prédiction de l'espèce

Deux modèles sont étudiés : une classification avec la procédure *Vsurf* basée sur *random forest* et un modèle logistique polytomique portant sur des variables sélectionnées via *random forest*.

Les erreurs de prédiction de l'espèce sur l'échantillon de calibration sont de 34 % pour les deux modèles, ce qui est cohérent mais quand même relativement élevé par rapport à la bibliographie où les taux varient entre 11 et 35 % (voir paragraphe 3.3.2).

Il faut néanmoins noter que dans cette étude, seules les informations contenues dans le nuage de point et dans la forme des couronnes ont été valorisées. L'intensité du signal LIDAR n'a pas été prise en compte car il est difficile de normaliser correctement ce paramètre (Heideman, 2013). Aucune autre source de données, comme par exemple des photos aériennes, n'a été utilisée conjointement. En effet dans ces conditions les problèmes de décalage planimétrique de quelques mètres empêchent de valoriser la signature spectrale du houppier à l'échelle de l'arbre (Jolly, A., com.pers).

Au niveau des modèles, le choix a été fait de sélectionner un lot de variables explicatives avec *random forest* avant d'affiner la prédiction avec un modèle logistique polytomique nominal. D'autres modèles en particulier des modèles non paramétriques pourraient être utilisés pour essayer de mieux coller à l'échantillon. Cependant il ne serait alors plus possible d'interpréter les modèles.

Le modèle logistique polytomique pourrait également être conservé mais avec une nouvelle sélection de variables. Cette sélection pourrait se faire en testant tous les modèles avec une, deux ou trois variables en fonction de leur erreur mais aussi de la corrélation entre variables et de la significativité de chacune d'entre elle pour la séparation de chacune des espèces.

### 4.3.3 - Modèle de prédiction de la hauteur

Le modèle étudié est un modèle linéaire additif qui prédit la hauteur en fonction de la hauteur mesurée par rapport au MNT en corrigeant l'effet de la verticalité des houppiers via la prise en compte de la pente.

Ce modèle montre de bons résultats avec une RMSE de 1,7 m sur l'échantillon de calibration. Ces résultats sont cohérents avec d'autres études avec des RMSE allant de 1,4 à 1,9 m environ (Heurich et al., 2004; Véga et al., 2008). Il est sensible à l'espèce de l'arbre : les houppiers de feuillus ont tendance à se déporter vers l'aval dans des zones de forte pente. La hauteur mesurée entre l'apex et le MNT est alors fortement surestimée. La dominance apicale étant plus forte chez les résineux, ils sont moins sensibles à ce phénomène.

Une piste d'amélioration serait de travailler sur la forme du houppier pour identifier les arbres penchés et corriger la hauteur pour chaque individu selon son inclinaison et selon la pente sous son apex.

### 4.3.4 - Modèle de prédiction du diamètre

Deux modèles sont étudiés : un modèle allométrique hyperbolique et un modèle linéaire additif.

Les RMSE sur l'échantillon de calibration sont respectivement de 10,6 et de 8,9 cm. Elles sont relativement élevées par rapport à la bibliographie, surtout pour le modèle allométrique.

Le modèle linéaire a un effet résiduel de l'espèce. Cependant lorsque l'espèce est rajoutée dans le modèle elle ne permet de gagner que 0,2 cm sur la RMSE du modèle. Ce modèle doit être en théorie recalibré pour chaque site et chaque vol. Cependant dans cette étude, il n'y a pas d'effet significatif du site ou de la densité d'émission LIDAR.

Le modèle allométrique est intéressant d'un point de vue structurel. Néanmoins il a été construit pour décrire des peuplements réguliers et mono-spécifiques. Son application sur les peuplements mélangés et irréguliers de montagne présente donc un fort effet résiduel espèce et densité de peuplement.

D'autres modèles allométriques qui valorisent l'information des caractéristiques du houppier pourraient être étudiés, notamment des allométries reliant le diamètre (D), au volume du houppier approximé par la biomasse du houppier (B) :  $b = c + b \times D^a$  (Picard et al., 2012). Cependant là aussi ces modèles allométriques sont très génériques. La prise en compte de l'espèce dans la prédiction du diamètre, permettrait de mieux affiner les paramètres de l'allométrie (Picard et al., 2012).

La prédiction du diamètre à l'échelle de l'arbre est très complexe du fait de nombreux facteurs dus à la structure du peuplement mais aussi à son histoire. Combiner une approche individuelle avec une approche au niveau de la placette pour prédire la distribution en diamètre des arbres (voir paragraphe 1.2.2), pourrait permettre de limiter les erreurs de prédiction, au moins à l'échelle du peuplement. En effet des modèles empiriques prédisent avec 10 % d'erreur de diamètre moyen à l'échelle de la placette (Munoz et al., 2016), et il semble raisonnable de penser qu'un indice relatif à l'échelle de la placette permettrait de limiter l'effet de la station et de la sylviculture.

#### **4.3.5 - Perspectives d'utilisation de la méthode**

La cartographie des arbres au A-LIDAR nécessite une réflexion et un investissement pour créer des jeux de validation et de calibration équilibrés, complets et avec un nombre suffisants d'individus. Cependant une fois les modèles calibrés sur ces échantillons, la cartographie est rapide à produire, y compris à grande échelle.

Cette méthode de cartographie est moins précise que les deux autres. Cependant pour une utilisation dans Rockyfor3D sur des zones importantes elle permettrait d'augmenter facilement la précision à l'échelle de l'arbre par rapport à un inventaire spécifique par peuplement. De plus comme Rockyfor3D nécessite un MNT relativement précis pour ses simulations, ces zones ont déjà eu pour ce but un survol LIDAR et il n'y aurait alors pas de coût d'acquisition de données supplémentaire pour obtenir la cartographie des arbres.

Cette méthode de cartographie a également l'avantage de ne pas nécessiter de déplacements sur le terrain dans les zones de chute de blocs, qui sont souvent dangereuses et difficiles d'accès.

L'approche individuelle à l'échelle de l'arbre peut également être intéressante à l'échelle d'une forêt pour prédire les principaux paramètres dendrométriques pour la gestion, aux côtés d'une approche surfacique et potentiellement corrigés d'un effet peuplement. Ceci en particulier pour déterminer les zones avec de nombreux arbres de gros diamètre, intéressantes pour positionner des lignes de câble rentables ou laisser des peuplements en libre évolution.

L'application de la segmentation a été réalisée à l'échelle d'un massif de 400 ha et donne de bons résultats. Une fois les modèles d'espèce, de hauteur et de diamètre calibrés sur cette zone il paraît tout à fait envisageable d'obtenir une cartographie à l'échelle de l'arbre sur cette surface.

## Conclusion

Le travail réalisé dans le cadre de ce stage a permis de mettre au point et d'évaluer plusieurs méthodes de cartographie individuelle des arbres dans des peuplements de montagne irréguliers et mélangés en sapin, épicéa et hêtre des Alpes du Nord ; à partir de technologies de télédétection LIDAR, aérien et terrestre. Cinq principaux résultats ont été obtenus.

Ce stage, principalement méthodologique, a abouti à la mise au point d'un protocole d'inventaire au T-LIDAR et à son application sur trois sites forestiers d'un hectare chacun environ. Les erreurs de calage sont de l'ordre de 1 cm pour les 40 scans de chaque site, dans des zones de montagne escarpées. La détection des arbres est presque parfaite puisque tous les arbres sont détectés au T-LIDAR ; et que l'espèce, grâce à un système de codage utilisant des sphères, a une erreur de prédiction de 4%, ce qui est équivalent aux erreurs constatées lors d'inventaires en plein. Les erreurs planimétriques des relevés de la position des arbres avec la méthode topographique classique sont de 1,3 m en moyenne, mais peuvent atteindre plus de 2 m pour les arbres éloignés du point de référence, alors qu'elles sont de l'ordre du centimètre avec le T-LIDAR grâce à la qualité du recalage des scans. En revanche l'erreur d'estimation semi-automatique des diamètres au T-LIDAR est de 3,4 cm en évacuant quelques cas litigieux d'arbres fourchus ou méplats, et de 4,7 cm dans le cas contraire. Ainsi, il est donc possible de cartographier, sur des surfaces de l'ordre d'un hectare, des peuplements forestiers dans le contexte de forêts alpines de fortes pentes avec des problématiques de chute de blocs, ce qui n'a pas été réalisé jusqu'à maintenant.

La détection des couronnes des arbres avec le A-LIDAR a été étudiée avec l'algorithme SEGMA, développé pour les forêts canadiennes. Ce stage a permis de participer au co-développement et à l'amélioration de cet algorithme qui a été adapté notamment au niveau du remplissage des cavités du MNT et du filtrage des petites couronnes. Les résultats sont très satisfaisants, en comparaison avec ceux d'un algorithme de référence (Monnet et al., 2010), utilisé sur les mêmes peuplements des Alpes du Nord. Le taux de détection des arbres tourne autour de 67 %, avec une erreur de commission toutefois un peu plus forte aux alentours de 20 % environ. Avec plus de 80 % des arbres dominants (de plus de 20 m de haut) bien détectés, SEGMA se classe parmi les meilleurs algorithmes (Eysn et al., 2015). Cependant, les arbres dominés, difficilement visibles au A-LIDAR, restent souvent non détectés. Des techniques complémentaires de modélisation utilisant la méthode surfacique permettraient peut-être d'affiner la prédiction des arbres dominés pour compléter la distribution des arbres bien détectés. Il faut toutefois noter un biais pour la détection des arbres dans les peuplements mélangés de montagne, où les feuillus, majoritairement dominés, sont souvent mal détectés (45 %), par rapport aux résineux (75 %).

La modélisation des caractéristiques dendrométriques des arbres depuis le A-LIDAR a été étudiée avec différents modèles. Pour la prédiction de l'espèce, une modélisation par *random forest* et une régression logistique polytomique montrent des taux de bonne classification de l'ordre de 65 %. Pour la modélisation de la hauteur, un modèle linéaire additif prenant en compte la hauteur mesurée par rapport au MNT et la pente locale a été étudié. Les résultats sont satisfaisants avec une erreur quadratique moyenne de 1,7 m. Il subsiste un biais résiduel de l'espèce, les feuillus ayant tendance à décaler leur apex vers l'aval jusqu'à 8 m pour intercepter plus de lumière. Pour la modélisation du diamètre, un modèle allométrique hyperbolique et un modèle linéaire ont été étudiés. L'erreur quadratique moyenne est de 10,6 cm pour le modèle allométrique et de 8,9 cm pour le modèle linéaire, ce qui est cohérent par rapport à la bibliographie mais relativement élevé pour une prédiction individuelle du diamètre.

Les impacts sur les résultats de SAMSARA pour les trois cartographies réalisées divergent de quelques pourcents, si l'on s'intéresse uniquement à la surface terrière ou à la densité de tiges après 50 ou 100 ans d'évolution en dynamique naturelle. En revanche au niveau de la structure, les mauvaises détections initiales des arbres dominés dans le nuage A-LIDAR induisent un déficit marqué en bois moyens après 100 ans de croissance simulée. De plus les erreurs initiales de détection d'espèce perturbent la dynamique d'évolution du point de vue de la composition. Pour le T-LIDAR après 100 ans d'évolution, seul un étalement plus marqué de la distribution des gros bois, cohérent avec l'étalement constaté initialement, le distingue de la cartographie manuelle. Ces résultats sont à interpréter avec prudence puisqu'ils ne concernent que le cas précis de la parcelle F de la forêt communale de Vaujany. D'autres scénarios d'évolution, différents de la dynamique naturelle et prenant en compte différentes modalités de modélisation de la régénération, pourraient enrichir l'analyse. Faute de temps, ces analyses n'ont pu être conduites dans le cadre de ce stage, tout comme la valorisation des informations sur la forme des couronnes ou le recouvrement de la régénération, qui sont potentiellement mesurables dans le nuage T-LIDAR, moyennant un important travail de segmentation dans *CompuTree*.

L'application de la cartographie individuelle des arbres sur de grandes surfaces a été abordée dans le cadre de ce stage, via l'application de SEGMA sur d'un massif de 400 ha. La chaîne de traitements de données par dalles fonctionne et a permis de détecter environ 180 000 couronnes en 18 h de traitement dont 17 pour la création de MNT et MNH précis. L'approche arbre en utilisant le A-LIDAR semble donc être applicable à l'échelle d'un massif du point de vue de la segmentation.

Ainsi, les cartographies des arbres par A-LIDAR et T-LIDAR sont réalisables, donnent des résultats cohérents dans ce contexte de peuplement de montagne, et pourraient avoir de nombreuses applications, aussi bien au niveau de la recherche que de la gestion forestière.

## Bibliographie

- Ahokas, E., others, 2013. Aspects of accuracy, scanning angle optimization, and intensity calibration related to nationwide laser scanning. Finnish Geodetic Institute.
- Archer, K.J., Kimes, R.V., 2008. Empirical characterization of random forest variable importance measures. *Comput. Stat. Data Anal.* 52, 2249–2260.
- Barilotti, A., Crosilla, F., Sepic, F., 2009. Curvature analysis of LiDAR data for single tree species classification in alpine latitude forests. *Laser Scanning* 1–2.
- Bauwens, S., Bartholomeus, H., Calders, K., Lejeune, P., 2016. Forest Inventory with Terrestrial LiDAR: A Comparison of Static and Hand-Held Mobile Laser Scanning. *Forests* 7, 127.
- Bednjanec, M., 2011. Calibration of ALS Intensity Data.
- Bienert, A., Scheller, S., Keane, E., Mohan, F., Nugent, C., 2007. Tree detection and diameter estimations by analysis of forest terrestrial laserscanner point clouds, in: *ISPRS Workshop on Laser Scanning*. pp. 50–55.
- Bonnet, S., Toromanoff, F., Bauwens, S., Michez, A., Dedry, L., Lejeune, P., 2013. Principes de base de la télédétection et ses potentialités comme outil de caractérisation de la ressource forestière–II. LiDAR aérien. *For. Wallonne* 28–41.
- Brassel, P. (Ed.), 2001. Swiss national forest inventory: methods and models of the second assessment. WSL Swiss Federal Research Institute, Birmensdorf.
- Colin, A., 2016. Disponibilités forestières pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035, Tome 1.
- Courbaud, B., Lafond, V., Lagarrigues, G., Vieilledent, G., Cordonnier, T., Jabot, F., de Coligny, F., 2015. Applying ecological model evaluation: Lessons learned with the forest dynamics model Samsara2. *Ecol. Model.* 314, 1–14.
- Dassot, M., Constant, T., Fournier, M., 2011. The use of terrestrial LiDAR technology in forest science: application fields, benefits and challenges. *Ann. For. Sci.* 68, 959–974.
- Deleuze, C., Blaudez, D., Hervé, J.C., 1996. Ajustement d'un modèle hauteur-circonférence pour l'épicéa commun. Effet de la densité, in: *Annales Des Sciences Forestières*. EDP Sciences, pp. 93–111.
- Dhôte, J.-F., Hercé, É. de, 1994. Un modèle hyperbolique pour l'ajustement de faisceaux de courbes hauteur-diamètre. *Can. J. For. Res.* 24, 1782–1790.
- Dorren, L., 2015. Rockyfor3D (v5.2) revealed, Transparent description of the complete 3D rockfall model1.
- Dupire, S., Bourrier, F., Monnet, J.-M., Berger, F., 2015. Sylvaccess: un modèle pour cartographier automatiquement l'accessibilité des forêts. *Rev. For. Fr.* 70, 111–126.
- Eysn, L., Hollaus, M., Lindberg, E., Berger, F., Monnet, J.-M., Dalponte, M., Kobal, M., Pellegrini, M., Lingua, E., Mongus, D., Pfeifer, N., 2015. A Benchmark of Lidar-Based Single Tree Detection Methods Using Heterogeneous Forest Data from the Alpine Space. *Forests* 6, 1721–1747.
- Gauquelin, X., 2006. Guide des sylvicultures de montagne: Alpes du nord françaises. Cemagref de Grenoble, Saint-Martin-d'Hères.
- Genuer, R., Poggi, J.-M., Tuleau-Malot, C., 2014. VSURF: un package R pour la sélection de variables à l'aide de forêts aléatoires, in: *46èmes Journées de Statistique*.
- Grün, A., Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (Eds.), 2007. Optical 3-D measurement techniques: applications in GIS, mapping, manufacturing, quality control, robotics, navigation, mobile mapping, medical imaging, cultural heritage, VF generation and animation ; papers presented to the conference organized at ETH Zurich, Switzerland, July 9 - 12, 2007. Zurich.
- Heidemann, H.K., 2012. Techniques and Methods (Techniques and Methods).
- Heurich, M., Persson, A., Holmgren, J., Kennel, E., 2004. Detecting and measuring individual trees with laser scanning in mixed mountain forest of central Europe using an algorithm developed for Swedish boreal forest conditions. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 36, 307–312.
- Hopkinson, C., Chasmer, L., Young-Pow, C., Treitz, P., 2004. Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar. *Can. J. For. Res.* 34, 573–583.
- Houllier, F., Bouchon, J., Birot, Y., 1991. Modélisation de la dynamique des peuplements forestiers: état et perspectives.
- Hyypä, J., Inkinen, M., 1999 ; Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. *The Photogrammetric Journal of Finland*, Vol.16, No. 2.

- Jauvart, D., 2013. Détection et classification d'arbres par scanner laser aéroporté. Grenoble : université Joseph Fourier (Stage de Master).
- Kaartinen, H., Hyyppä, J., Yu, X., Vastaranta, M., Hyyppä, H., Kukko, A., Holopainen, M., Heipke, C., Hirschmugl, M., Morsdorf, F., Næsset, E., Pitkänen, J., Popescu, S., Solberg, S., Wolf, B.M., Wu, J.-C., 2012. An International Comparison of Individual Tree Detection and Extraction Using Airborne Laser Scanning. *Remote Sens.* 4, 950–974.
- Kim, S., 2007. Individual tree species identification using LIDAR-derived crown structures and intensity data. University of Washington.
- Koch, B., Heyder, U., Weinacker, H., 2006. Detection of individual tree crowns in airborne lidar data. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 72, 357–363.
- Korpela, I., Tokola, T., Ørka, H.O., Koskinen, M., 2009. Small footprint discrete-return LiDAR in tree species recognition, in: *Proceedings of the ISPRS.* pp. 2–5.
- Leckie, D., Gougeon, F., Hill, D., Quinn, R., Armstrong, L., Shreenan, R., 2003. Combined high-density lidar and multispectral imagery for individual tree crown analysis. *Can. J. Remote Sens.* 29, 633–649.
- Leckie, D.G., Gougeon, F.A., Tinis, S., Nelson, T., Burnett, C.N., Paradine, D., 2005. Automated tree recognition in old growth conifer stands with high resolution digital imagery. *Remote Sens. Environ.* 94, 311–326.
- Liang, X., Hyyppä, J., Matikainen, L., 2007. Deciduous-coniferous tree classification using difference between first and last pulse laser signatures. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 36.
- Mallet, C., Bretar, F., 2007. Le Lidar topographique à retour d'onde complète: état de l'art.
- Maltamo, M., Næsset, E., Vauhkonen, J., 2014. Forestry applications of airborne laser scanning. *Concepts and case studies. Manag For Ecosys*, 2014, vol. 27.
- Monnet, J.-M., Mermin, É., 2014. Cross-Correlation of Diameter Measures for the Co-Registration of Forest Inventory Plots with Airborne Laser Scanning Data. *Forests* 5, 2307–2326. doi:10.3390/f5092307
- Monnet, J.-M., Mermin, E., Chanussot, J., Berger, F., 2010. Tree top detection using local maxima filtering: a parameter sensitivity analysis, in: *10th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems (Silvilaser 2010).* p. 9–p.
- Monnet, J.-M., Munoz, A., 2015. Comparaison de méthodes de spatialisation pour l'agrégation par parcelle des estimations de paramètres forestiers par LiDAR aéroporté. *Rev. Fr. Photogrammétrie Télédétection Ce Numéro.*
- Morsdorf, F., Meier, E., Kötz, B., Itten, K.I., Dobbertin, M., Allgöwer, B., 2004. LIDAR-based geometric reconstruction of boreal type forest stands at single tree level for forest and wildland fire management. *Remote Sens. Environ.* 92, 353–362.
- Munoz, A., 2014. Le positionnement par satellite : les nouveaux récepteurs améliorent-ils les performances sous couvert forestier. *RenDez-Vous Techniques de l'ONF*, Vol. 43, pp. 54-62.
- Munoz, A., Bock, J., Monnet, J.-M., Renaud, J.P., Jolly, A., Rioud, C., 2016. Evaluation par validation indépendante des prédictions des paramètres forestiers réalisées à partir de données LIDAR aéroporté.
- Næsset, E., 2004. Practical large-scale forest stand inventory using a small-footprint airborne scanning laser. *Scand. J. For. Res.* 19, 164–179.
- ONF, 2006. Directive Régionale d'Aménagement, Rhône Alpes.
- Othmani, A., 2014. Identification automatisée des espèces d'arbres dans des scans laser 3D réalisés en forêt. Université de Bourgogne.
- Othmani, A., Piboule, A., Krebs, M., Stolz, C., Voon, L.L.Y., 2011. Towards automated and operational forest inventories with T-Lidar, in: *11th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems (SilviLaser 2011).*
- Penner, M., Woods, M., Pitt, D., 2015. A Comparison of Airborne Laser Scanning and Image Point Cloud Derived Tree Size Class Distribution Models in Boreal Ontario. *Forests* 6, 4034–4054.
- Persson, A., Holmgren, J., Söderman, U., 2002. Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 68, 925–932.
- Persson, A., Holmgren, J., Söderman, U., Olsson, H., 2004. Tree species classification of individual trees in Sweden by combining high resolution laser data with high resolution near-infrared digital images. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 36, 204–207.

- Picard, N., Saint-André, L., Henry, M., 2012. Manuel de construction de quations allométriques pour l'estimation du volume et la biomasse des arbres. Cent. Coop. Int. En Rech. Agron. Pour Dév. Food Agric. Organ. U. N. Rome Italy 211.
- R Core Team, 2016. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Schütt, C., Aschoff, T., Winterhalder, D., Thies, M., Kretschmer, U., Spiecker, H., 2004. Approaches for recognition of wood quality of standing trees based on terrestrial laserscanner data. *Laser-Scanners For. Landsc. Assess. Proc. ISPRS Work. Group VIII2 Freibg. Ger. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 36, 179–182.
- Simonse, M., Aschoff, T., Spiecker, H., Thies, M., 2003. Automatic determination of forest inventory parameters using terrestrial laser scanning. Institute for Forest Growth, Freiburg.
- St-Onge, B., 2008. Methods for improving the quality of a true orthomosaic of Vexcel UltraCam images created using a lidar digital surface model. *Proc. SilviLaser 2008*, 8th.
- Thomas, V., Oliver, R.D., Lim, K., Woods, M., 2008. LiDAR and Weibull modeling of diameter and basal area. *For. Chron.* 84, 866–875.
- Van der Zande, D., Hoet, W., Jonckheere, I., van Aardt, J., Coppin, P., 2006. Influence of measurement set-up of ground-based LiDAR for derivation of tree structure. *Agric. For. Meteorol.* 141, 147–160.
- Vauhkonen, J., Korpela, I., Maltamo, M., Tokola, T., 2010. Imputation of single-tree attributes using airborne laser scanning-based height, intensity, and alpha shape metrics. *Remote Sens. Environ.* 114, 1263–1276.
- Véga, C., Durrieu, S., 2008. Extraction de paramètres d'arbre à partir de modèles numériques de canopée lidar. *Rev. Française Photogramm. Teledetection* 62.
- Véga, C., Durrieu, S., 2011. Multi-level filtering segmentation to measure individual tree parameters based on Lidar data: Application to a mountainous forest with heterogeneous stands. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation* 13, 646–656.
- Vega, C., Hamrouni, A., El Mokhtari, S., Morel, J., Bock, J., Renaud, J.-P., Bouvier, M., Durrieu, S., 2014. PTrees: A point-based approach to forest tree extraction from lidar data. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation* 33, 98–108.
- Waser L T., Ginzler Ch., Kuchler M., Lanz A., Baltsavias E., 2009. Semiautomatic prediction of main tree species using multi-temporal ADS40 data. *Extending Forest Inventory and Monitoring over space and time.*
- Wezyk, P., Koziol, K., Glista, M., Pierzchalski, M., 2007. Terrestrial laser scanning versus traditional forest inventory: First results from the Polish forests, in: *Proceedings of the ISPRS Workshop 'Laser Scanning.* pp. 12–14.
- White, J., Service canadien des forêts, Centre canadien sur la fibre de bois, 2014. Guide des meilleures pratiques pour générer des attributs d'inventaire forestier provenant de données obtenues par balayage laser aéroporté en utilisant une approche par zones.
- Yee, T.W., 2010. The VGAM package for categorical data analysis. *J. Stat. Softw.* 32, 1–34.

## Liste des contacts

<b>Nom</b>	<b>Organisme</b>	<b>Fonction</b>	<b>e-mail</b>
Bock Jérôme	ONF Chambéry	Chargé de R&D	jerome.bock@onf.fr
Courbaud Benoît	IRSTEA Grenoble	Chercheur	benoit.courbaud@onf.fr
Monnet JeanMatthieu	IRSTEA Grenoble	Ingénieur de recherche	jean-matthieu.monnet@irstea.fr
Munoz Alain	ONF Chambéry	Spécialiste SIG	alain.munoz@onf.fr
Piboule Alexandre	ONF Nancy	Chargé de R&D	alexandre.piboule@onf.fr
Riond Catherine	ONF Chambéry	Chef de pôle R&D	catherine.riond@onf.fr
St-Onge Benoît	UQAM	Professeur géographie	benoit.st-onge@uqam.ca

## Annexes

Annexe 1 : fiche technique du scanner FARO Focus 3D.....	67
Annexe 2 : Protocole T-LIDAR utilisé en Décembre 2015 par l'ONF .....	69
Annexe 3 : Notice opérationnelle d'utilisation du scanner FARO® Focus 3D.....	70
Annexe 4 : Résultats des tests de visibilité des sphères en polystyrène .....	77
Annexe 5 : Résultats du test de repositionnement des sphères sur des rondelles métalliques.....	78
Annexe 6 : protocole de scan T-LIDAR développé et appliqué aux 3 sites d'étude .....	79
Annexe 7 : Détail des étapes de CompuTree pour la détermination du diamètre et de la position .....	84
Annexe 8 : Script R utilisé pour la reconnaissance automatique des espèces .....	85
Annexe 9 : Notice opérationnelle de traitement de l'espèce des arbres au T-LIDAR.....	89
Annexe 10 : Détail des étapes de SEGMA dans <i>CompuTree</i> .....	97
Annexe 11 : Détail des métriques utilisées dans les modèles.....	99
Annexe 12 : Valeurs des coefficients du modèle de prédiction de la hauteur (2) .....	101
Annexe 13 : Valeurs des coefficients du modèle allométrique de prédiction du diamètre (3).....	101

## Annexe 1 : fiche technique du scanner FARO Focus 3D

# FARO® Laser Scanner Focus<sup>3D</sup> X 130

Le nouveau scanner laser puissant de la Série X

# FARO



### NUMÉRISATION DE MOYENNE PORTÉE JUSQU'À 130 M

Avec une portée allant jusqu'à 130 m, le Focus<sup>3D</sup> X 130 est idéal pour les relevés laser en architecture, BIM, conservation du patrimoine, médecine légale, construction navale, construction, industrie des procédés, imagerie de synthèse, etc.

### POSITIONNEMENT AISÉ - RÉCEPTEUR GPS INTÉGRÉ

Avec son récepteur GPS intégré, le scanner laser est capable de mettre en corrélation des numérisations individuelles lors du post-traitement, ce qui le rend idéal pour les applications de relevé 3D.

### EXTRA PORTABLE

Avec 24 x 20 x 10 cm, le Focus<sup>3D</sup> X 130 ne pèse que 5,2 kg. Un Poêcase étanche, un sac à dos ergonomique avec un support pour trépied rendent l'appareil complètement portable.

### WLAN

La télécommande WLAN du Focus<sup>3D</sup> permet de démarrer, stopper ou visualiser des numérisations à distance.

### MEILLEUR RAPPORT QUALITÉ-PRIX

Unique sur le marché, le Focus<sup>3D</sup> X 130 offre des performances remarquables à un coût abordable.

## SCANNER LASER DE MOYENNE PORTÉE DE LA SÉRIE X

Le FARO Focus<sup>3D</sup> X 130 est un scanner laser 3D très rapide et puissant adapté à toutes sortes d'applications. Ultra-portable, il permet le relevé rapide, direct et précis de façades, de structures complexes, d'installations de production et d'alimentation, de lieux d'accidents et de composants volumineux. Combinant une technologie de numérisation très précise avec une véritable mobilité et facilité d'utilisation, le nouvel appareil offre fiabilité, flexibilité et visualisation en temps réel des données enregistrées. Les données numérisées 3D peuvent être importées facilement dans les solutions logicielles courantes pour la reconstitution d'accident, l'architecture, le génie civil, la construction, la médecine légale ou la fabrication industrielle.

Avec une batterie d'une durée de 4,5 heures, le scanner laser offre une grande flexibilité et autonomie. Le poids léger du Focus, ses dimensions réduites et sa carte SD le rendent vraiment mobile.

## AVANTAGES

Le nouveau FARO Focus<sup>3D</sup> X 130 est un scanner laser de moyenne portée puissant et abordable pour les applications de documentation 3D.

Sa vitesse d'acquisition d'un million de points /seconde, sa facilité d'utilisation, sa portabilité, son volume de mesure jusqu'à 130 m, son GPS intégré, son niveau de bruit très réduit ainsi qu'un contrôle à distance via WLAN en font un outil universel pour tout type d'environnements de travail.

# FARO® Laser Scanner Focus<sup>3D</sup> X 130 **FARO**

www.faro.com

## CARACTÉRISTIQUES DE PERFORMANCES FOCUS<sup>3D</sup> X 130

### Unité de mesure de distance

Intervalle d'ambiguïté : >130 m  
 Portée du Focus<sup>3D</sup> X 130 : 0,6 m - 130 m en intérieur ou extérieur avec incidence verticale sur une surface réfléchissante à 90°  
 Taux de scan (points /s) : 122 000 / 244 000 / 488 000 / 976 000  
 Incertitude de mesure<sup>1</sup> : ±2 mm

Bruit de mesure <sup>2</sup>	à 10m	à 10 m - compression du bruit <sup>3</sup>	à 25m	à 25 m - compression du bruit <sup>3</sup>
à 90 % de réfl.	0,3 mm	0,15 mm	0,3 mm	0,15 mm
à 10 % de réfl.	0,4 mm	0,2 mm	0,5 mm	0,25 mm

### Unité couleur

Résolution : Couleur jusqu'à 70 mégapixels  
 Couleur dynamique : Adaptation automatique de la luminosité  
 Parallaxe : Design coaxial

### Défecteur

Champ de vision (vertical/hor.) : 300°<sup>4</sup> / 360°  
 Résolution (verticale/hor.) : 0,009° (40 960 points 3D sur 360°) / 0,009° (40 960 points 3D sur 360°)  
 Vitesse max. de rotation du miroir : 5 820 rpm ou 97 Hz

### Laser (émetteur optique)

Classe laser : Laser de classe 1  
 Longueur d'onde : 1 550 nm  
 Divergence du rayon : Typique 0,19 mrad (0,011°) (1/e, demi-angle)  
 Diamètre du rayon (à la sortie) : Typique 2,25 mm (1/e, demi-angle)

### Gestion des données et commande

Stockage des données : SD, SDHC™, SDXC™; carte de 32 GB fournie avec l'appareil  
 Commande du scanner : Par écran tactile et WLAN  
 Nouvel accès WLAN : La commande du scanner à distance, la visualisation et le téléchargement des numérisations sont possibles sur des terminaux mobiles équipés de Flash®.

### Multi-Capteurs

Compensateur biaxial : Nivelé chaque numérisation ; précision 0,015° (plage de mesure ±5°)  
 Capteur de hauteur : Un baromètre électronique permet de calculer la hauteur relative par rapport à une valeur de référence et de l'attribuer aux numérisations.

Boussole<sup>5</sup> : La boussole électronique fournit aux numérisations des données d'orientation par rapport aux points cardinaux. Une fonction de calibrage est disponible.

GPS : Récepteur GPS intégré

**CLASS 1  
LASER PRODUCT**

<sup>1</sup> L'incertitude de mesure se définit comme une erreur systématique de mesure à 10 m et 25 m, un sigma. Compensation améliorée disponible pour le montage dédié (service payant).<sup>2</sup> Le bruit de mesure est défini comme l'écart standard des valeurs sur le meilleur plan d'ajustement à une vitesse d'acquisition de 122 000 points /s.<sup>3</sup> Un algorithme de compression du bruit peut être activé, comprimant ainsi le bruit des données brutes par un facteur de 2 à 4.<sup>4</sup> Des objets ferromagnétiques peuvent perturber le champ magnétique terrestre et rendre les mesure imprécises.<sup>5</sup> 2x150° - L'espacement homogène des points n'est pas garanti. Informations susceptibles d'être modifiées sans indication préalable.

## GÉNÉRAL

Alimentation électrique :	19 V (alimentation externe) 14,4 V (batterie interne)	Connecteur du câble :	Situé dans le support du scanner
Consommation électrique :	40 W et 80 W (pendant la charge de la batterie)	Poids :	5,2 kg
Autonomie de la batterie :	4,5 heures	Dimensions :	240 x 200 x 100 mm
Température :	5° - 40° C	Maintenance / Calibrage :	Une fois par an
Humidité :	Sans condensation		



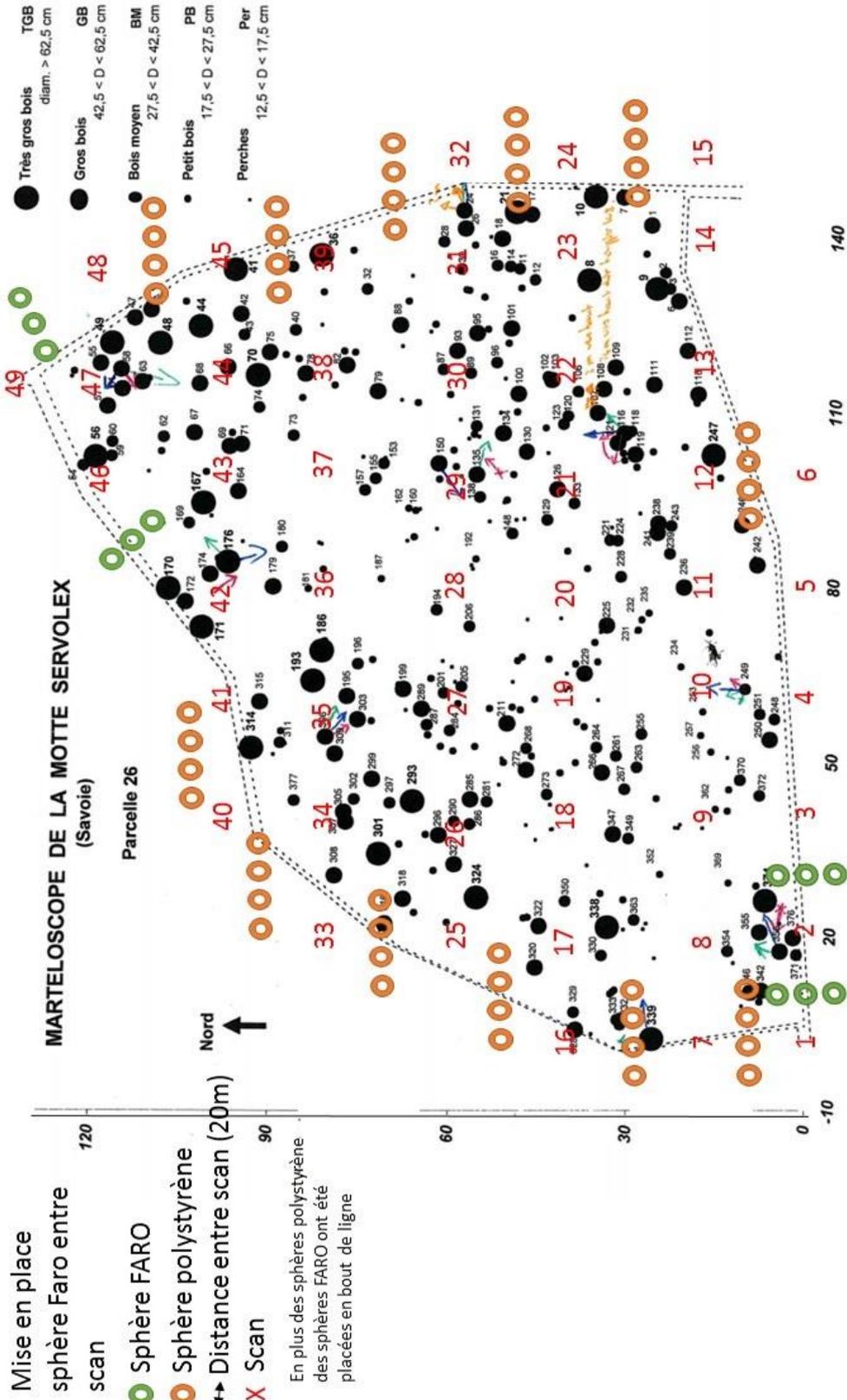
Contract Holder

Global Offices: Australia • Brazil • China • France • Germany  
 India • Italy • Japan • Malaysia • Mexico • Netherlands  
 Philippines • Poland • Portugal • Singapore • Spain • Switzerland  
 Thailand • Turkey • United Kingdom • USA • Vietnam

www.faro.com  
 Freecall 00 800 3276 7253  
 info@faro-europe.com



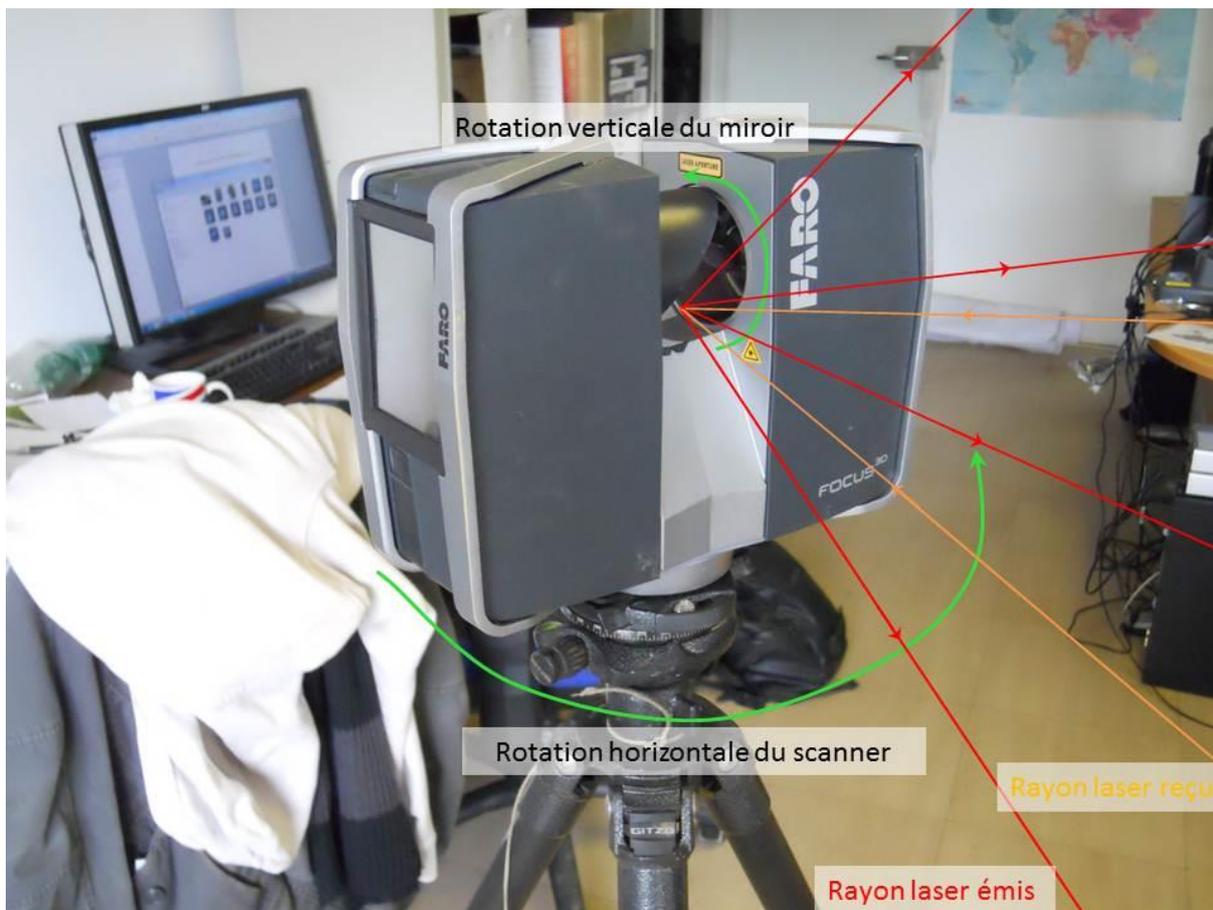
## Annexe 2 : Protocole T-LIDAR utilisé en Décembre 2015 par l'ONF



## Annexe 3 : Notice opérationnelle d'utilisation du scanner FARO® Focus 3D Utiliser le scanner LIDAR terrestre FARO® Focus 3D

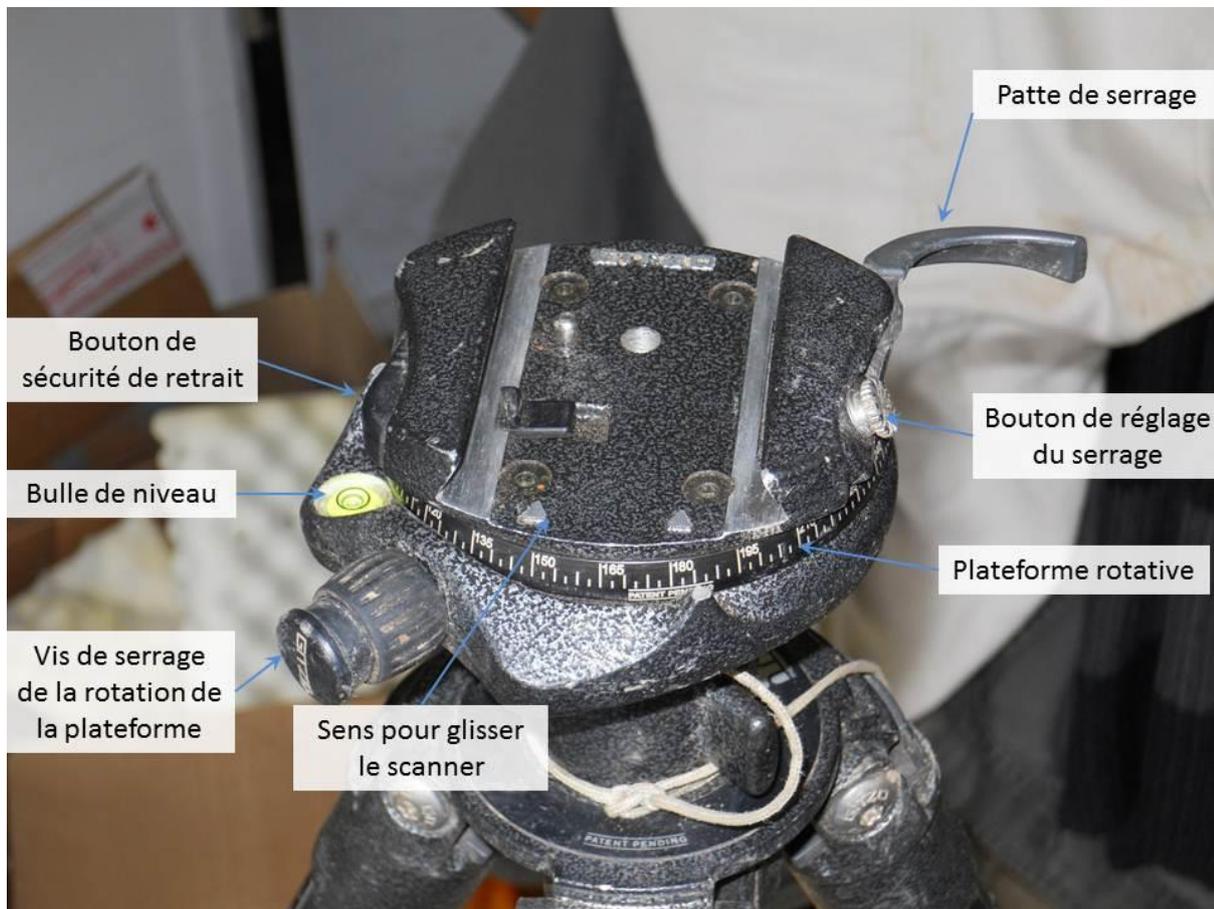
### Présentation de l'appareil

Ce scanner permet d'avoir un nuage de points en 3 dimensions d'une zone. Concrètement il envoie dans toutes les directions un rayon laser, ce rayon laser se réfléchit sur les objets (par exemple le tronc d'un arbre) et retourne vers le scanner. Le scanner mesure alors le temps qu'a mis le rayon pour faire l'aller-retour et, connaissant la vitesse de la lumière, en déduit à quelle distance se trouve le tronc. Cette opération est effectuée avec des millions de rayons de rayons laser, ce qui permet d'avoir une image avec plusieurs millions de points en 3 dimensions.



## Utilisation du scanner

**Remarque préalable :** étant donné le prix très élevé de cet appareil, il convient de le manipuler avec toutes les précautions possibles et d'éviter de l'exposer à des aléas (pluie, neige, vent, risque de chute, ...)



- **réglage du trépied :** positionner le trépied dans une configuration stable puis mettre la plateforme à l'horizontale à l'aide de la bulle de niveau en modifiant la longueur des pieds.

- **libération de la plateforme :** pour installer plus facilement le scanner, desserrer la vis de serrage de la plateforme pour que celle-ci puisse tourner librement

- **ouvrir la patte de serrage**

- **positionnement du scanner :** prendre le scanner en ayant vers soi la face avec l'écran puis le faire glisser sur la plateforme en suivant le sens des petites flèches en métal

- **fixation du scanner :** une fois le scanner positionné, serrer la patte de serrage, si le serrage n'est pas suffisant, l'adapter à l'aide du bouton de réglage. Visser la vis qui contrôle la rotation de la plateforme pour éviter que le scanner la fasse tourner, ce qui fausserait les mesures.

Le scanner est maintenant positionné pour commencer le scan.

Pour **enlever le scanner**, ouvrir la patte de serrage et appuyer sur le bouton de sécurité de retrait avant de faire glisser le scanner dans la direction de sa face avec l'écran.



Une fois le scanner fixé sur le pied, enlever la protection du miroir en essayant de ne pas faire pivoter celui-ci.



Allumer le scanner en appuyant sur le bouton de la face supérieure

## Ecran d'accueil



Visualiser les paramètres de scan

Visualiser les scans précédents

Gérer les paramètres du scan

**Remarque :** entre deux scans il n'y a rien à paramétrer, il suffit d'appuyer de nouveau sur « start scan » pour démarrer le nouveau scan.

**Remarque :** quand le scanner émet des rayons laser il s'allume en rouge. Il faut alors éviter de le regarder. Si l'on se trouve plus proche que la distance de sécurité, porter les lunettes de protection.

## Gérer les paramètres du scan



## Gérer les projets



Créer un nouveau projet

Projet actif (dossier où sont rangés les scans que l'on réalise)

## Gérer les profils



Créer un nouveau profil

Profil actif (paramètres des scans que l'on réalise)

## Paramètres du profil



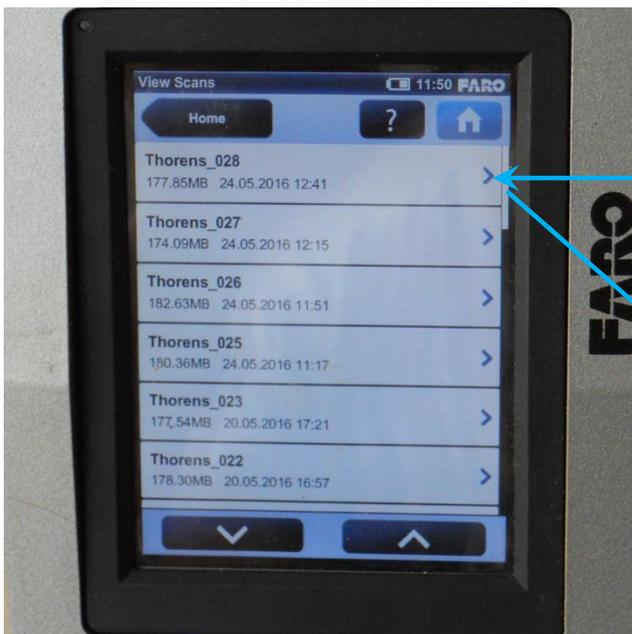
Qualité et résolution (densité du nuage de points)

Définition de la zone de l'espace scannée

Capteurs utilisés pour caler les scans

Paramètres pour ajouter les couleurs sur les scans

## Visualiser les scans



Cliquer sur un scan pour l'afficher



## Visualiser les paramètres de scan



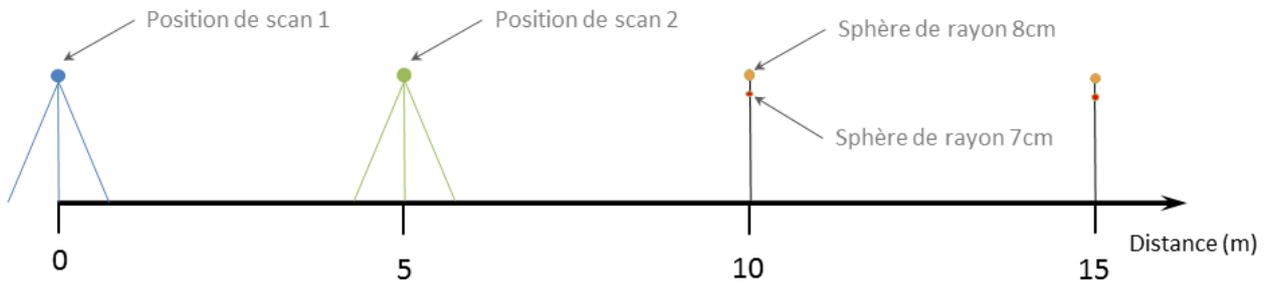
**Arrêt du scanner :** aller dans « Manage » pour gérer les paramètres de scan



Cliquer sur « shut down scanner »

Faire dérouler le menu jusqu'en bas

## Annexe 4 : Résultats des tests de visibilité des sphères en polystyrène



Liliane DUBAND – ONF RDI Chambéry – Mai 2016

		Distance au scanner (m)		
		5	10	15
Diamètre Sphère (cm)	7	Visible	Visible	Invisible
	8	Visible	Visible	Visible

Visibilité dans FARO® Scene	
Visible	Bonne visibilité
Visible	Visibilité moyenne
Visible	Mauvaise visibilité

	Sphère 1	Sphère 2	Sphère 3
Diamètre sphère (cm)	7	8	8
Distance scanner 1 (m)	10	10	15
Distance scanner 2 (m)	5	5	10
Tension d'appariement (mm)	2,1	1,94	3,9

## Annexe 5 : Résultats du test de repositionnement des sphères sur des rondelles métalliques

Scan 1 : avant déplacement des sphères

Scan 2 : après déplacement des sphères

Sphères FARO							
	Coordonnées scan 1			Coordonnées scan 2			
	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	Dist (m)
Sphère 1	-1,276173	6,403784	956,033378	-1,276362	6,403813	956,032803	0,00060596
Sphère 2	4,35207	0,67546	955,305107	4,3521	0,675765	955,304396	0,00077424
Sphère 3	-6,378903	-8,715132	955,238106	-6,378227	-8,715386	955,237534	0,00092124

## Annexe 6 : protocole de scan T-LIDAR développé et appliqué aux 3 sites d'étude

### Inventaire d'une zone forestière au LIDAR terrestre – Protocole

#### Matériel :

- Scanner LIDAR FARO Focus 3D
- Trépied en carbone
- 6 Sphères de calage FARO en polycarbonate (diamètre 14cm)
- 100 Sphères en polystyrène (diamètre 8cm)
- 6 Piquets métalliques d'inventaire (hauteur 1m)
- Piquets en bois (hauteur 2m) autant que de position de scan (environ 40)
- 6 Rondelles FARO
- Clous – Vis
- Marteau
- Serpe
- tournevis

**Participants :** 2 personnes minimum, 3 si besoin

**Localisation :** privilégier des zones d'accès facile depuis une voiture (ce protocole nécessite beaucoup de matériel qu'il est difficile de transporter sur une longue distance)

**Temps moyen** (installation et récupération du matériel comprises) : 40' par scan sur le plat, 80' par scan dans des fortes pentes

#### Points à vérifier avant de partir sur le terrain :

- La météo (l'appareil ne tolère pas la pluie ou la neige, même fines (risque d'abimer le miroir rotatif), il est déconseillé de l'utiliser dans un brouillard trop épais (possibilité de diffraction du rayon LASER qui pourrait fausser les mesures)
- Le chargement des deux batteries du LIDAR (en utilisation classique compter une batterie par demi-journée)
- L'absence d'oubli de matériel de la liste ci-dessus

### Phase 1 : piquetage et préparation de la zone

- **Repérage des limites de la zone d'étude :** (peinture ou petits piquets)

- **Piquetage des positions de scan :** avec les piquets en bois de 2m sur la totalité de la zone (il faut donc autant de piquets de que positions de scan prévues).

Pour être rigoureux, les piquets doivent avoir une bande de peinture au niveau de la position qu'occupera le scanner lorsqu'il sera positionné à cet endroit sur le trépied (ceci permet de voir si une sphère de calage est visible ou non depuis la position de scan suivante).

Les piquets sont placés selon une grille carrée de 15m. Cependant cette grille est indicative : il faut essayer de maximiser la visibilité depuis le point de scan (limiter au maximum la présence proche de gros arbres ou de cépées), pour éviter d'oublier des arbres. Les distances entre les positions de scan peuvent donc varier localement à 2 ou 3m près.

- **Nettoyage rapide de la zone d'étude :** le sous étage, les branches basses ou la régénération peuvent réduire la visibilité dans certaines directions (zones d'occlusion). Cela peut conduire à l'oubli d'arbres ou bien à une mauvaise estimation de leur diamètre ou encore à une mauvaise visibilité des sphères de calage. Pour éviter cela, il est conseillé de couper, de façon raisonnable, les branches ou le sous étage qui limiteraient fortement la visibilité localement. Le temps nécessaire à cette étape est très variable.

## Phase 2 : Inventaire

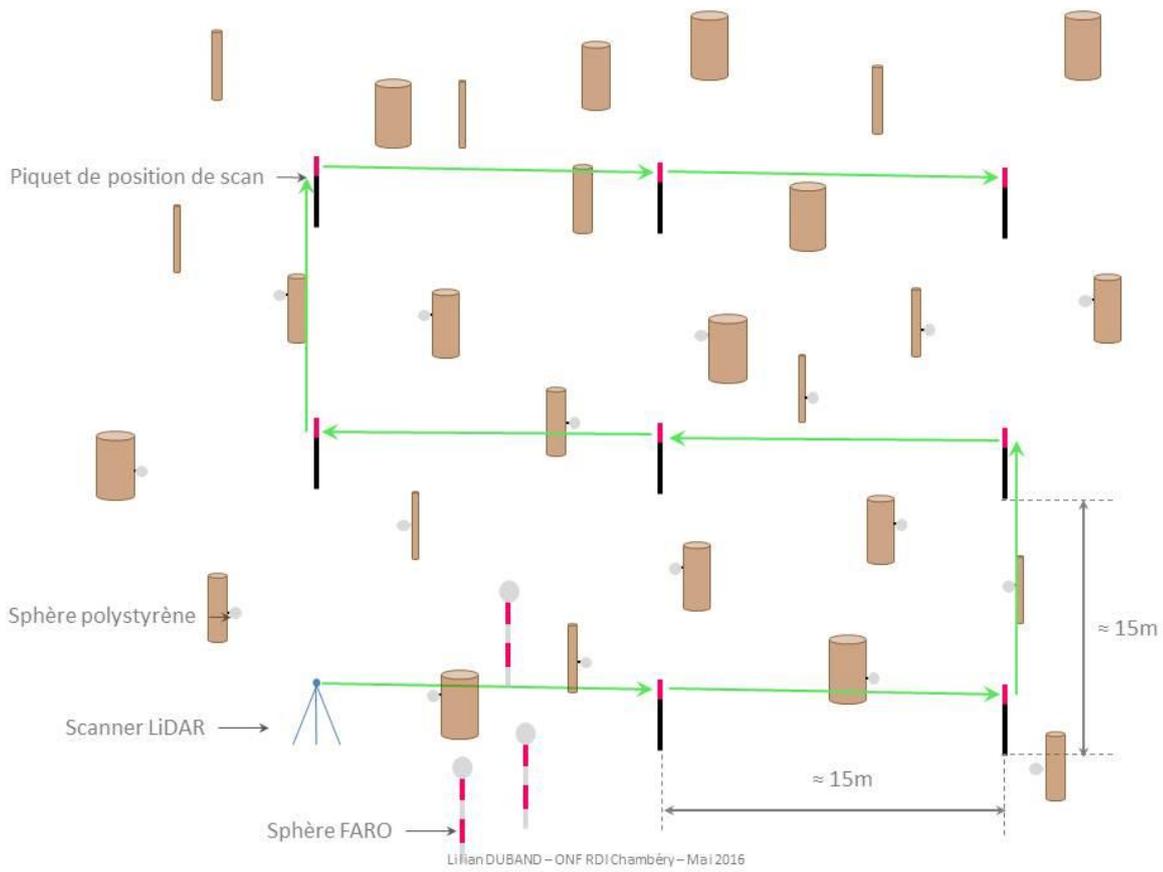
- **Positionnement des sphères de reconnaissance des essences :** placer les sphères en polystyrène de 8cm de diamètre sur les arbres. Choisir une combinaison par essence avec possibilité de mettre une essence en abandon (pas de marquage). Voir la fiche détaillée sur le marquage des essences pour les différentes combinaisons de boules possibles à la fin du document. Placer autant sphères que possible avant de commencer à scanner.

- **Positionnement des sphères de calage transversal des scan :** essayer autant que possible de placer les sphères de reconnaissance des essences pour qu'elles soient visibles par plusieurs scans, elles serviront alors de sphères de calage transversal. Il doit y avoir au minimum 3 sphères visibles entre chaque scan. Si jamais le choix est fait de ne pas marquer les essences, alors il faut placer au moins 3 de ces sphères visibles entre chaque scan.

- **Positionnement des sphères de calage longitudinal des scans :** placer 3 sphères FARO (sur les piquets métalliques de 1m) entre la première position de scan et la suivante. Une fois le scan réalisé, placer les 3 autres sphères entre la deuxième et la troisième position de scan. Par la suite déplacer les sphères de manière à ce qu'au moment où le scan est réalisé, il y ait 3 sphères pour faire le lien avec la position précédente et 3 sphères pour faire le lien avec la position suivante. Les sphères doivent être placées sur des piquets relativement courts pour éviter que le piquet ne bouge sous son propre poids entre les scans. De plus il faut éviter de se déplacer à proximité des sphères une fois que celles-ci sont positionnées afin d'éviter de les faire bouger, ce qui peut ensuite créer des erreurs de calage importantes. En zone de pente, contourner les piquets systématiquement par le bas pour éviter de faire chuter une pierre sur les sphères. Il est également possible de placer la sphère FARO aimantée sur une rondelle fixé sur un arbre ou une souche.

- **Scan de la zone :** (voir le mode d'emploi du scanner) placer le scanner sur la première position et lancer le scan. Le déplacer ensuite avec le trépied jusqu'à la position de scan suivante. Déplacer les sphères FARO les plus éloignées, les mettre entre le scanner et la position de scan suivante et lancer le scan. Vérifier rapidement sur la visualisation du scanner qu'il n'y a pas eu d'erreur flagrante pendant l'opération. Pendant le même temps, il est possible de récupérer des sphères en polystyrène qui ont déjà été scannées par 2 scans pour les placer sur la suite du trajet du scanner. Répéter ces opérations jusqu'à ce que tous les scans aient été réalisés.

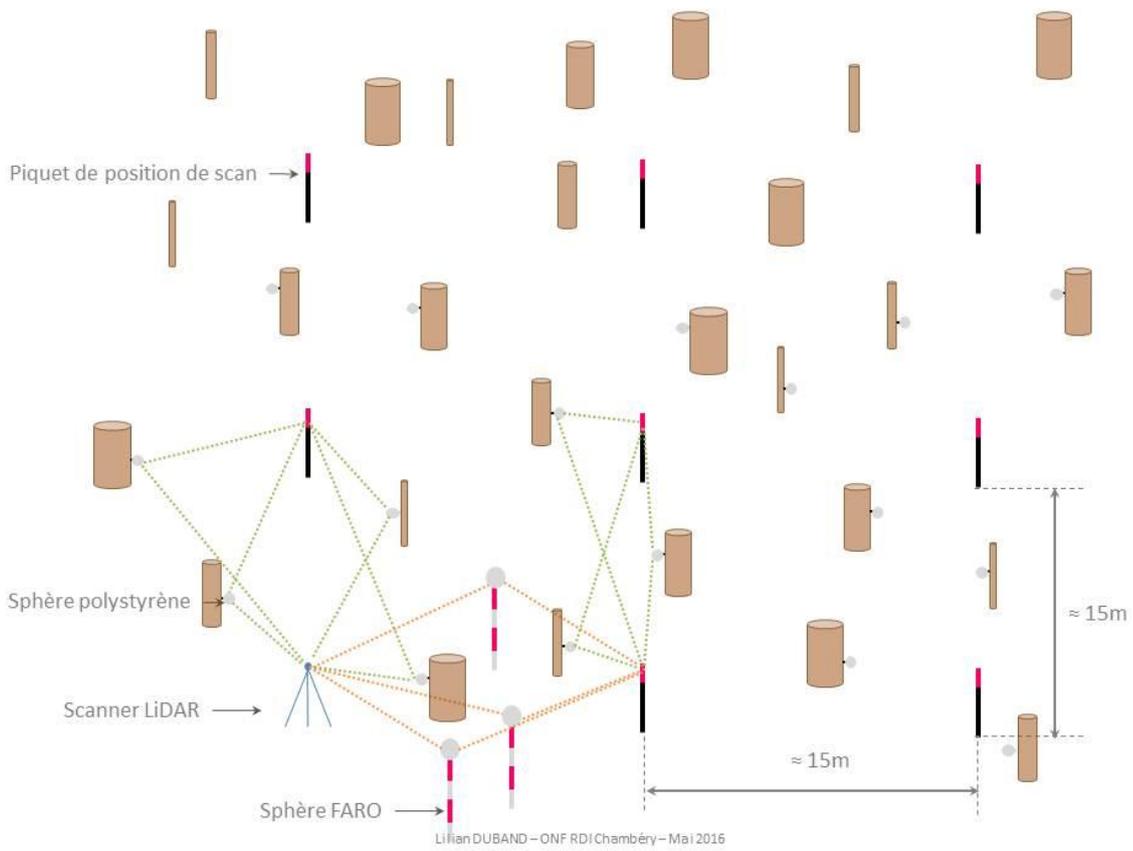
Le cheminement dans la grille de scan doit de faire en mode boustrophédon (autrement dit : le mode « serpent ») afin de minimiser les erreurs de calage.



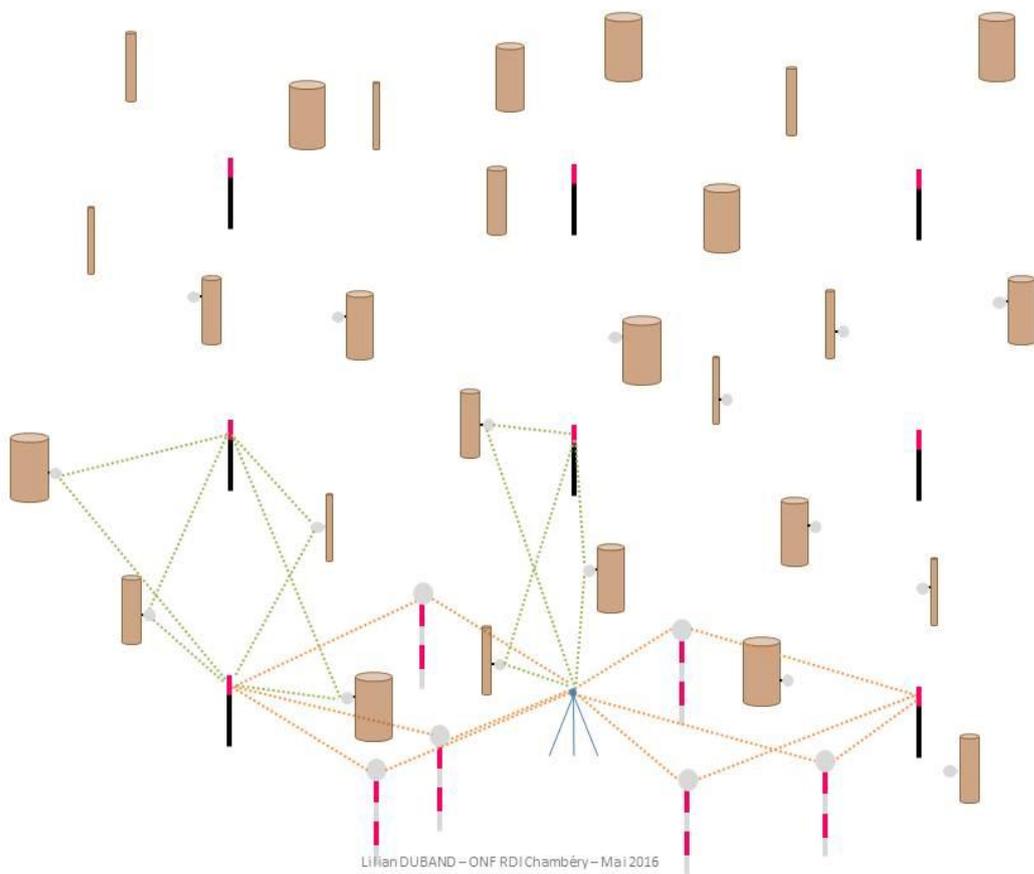
Le long du serpent les scans sont calés entre eux avec les sphères de calage longitudinal (les sphères FARO).

Entre les méandres du serpent, les scans sont calés entre eux avec les sphères de calage transversal (les sphères en polystyrène)

### Premier scan



### Deuxième scan

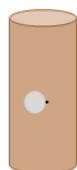


- **Arrêt du scan et reprise un autre jour** : sur de grandes zones, il n'est pas possible de réaliser tous les scans en une seule journée. Le meilleur moment pour arrêter le dispositif est lorsque l'on a fini une ligne de scan (horizontale sur le schéma), et que l'on passe à la suivante.

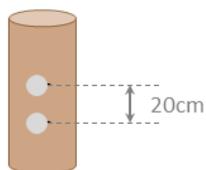
Les 3 sphères FARO qui vont faire le lien le dernier scan de la journée et celui du lendemain doivent pouvoir être repositionnées précisément le lendemain. Pour cela clouer ou visser les rondelles FARO dans un arbre (attention la rondelle une fois fixée doit être immobile, sinon il y aura introduction d'erreurs dans le calage). Une fois les rondelles fixées, placer dessus les 3 sphères aimantées FARO et faire le scan. Au moment de partir récupérer toutes les sphères FARO et ne laisser sur place que les sphères en polystyrène qui ont été scannées sur la dernière ligne de scan et qui seront visibles depuis la ligne suivante.

Le lendemain, replacer les sphères FARO sur les rondelles et placer autant des sphères de calage que possible avant de recommencer les scans.

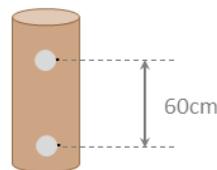
### Différentes combinaisons disponibles pour la reconnaissance des essences



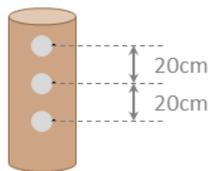
Code 1



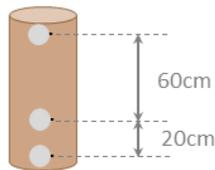
Code 2



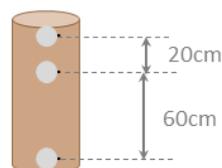
Code 3



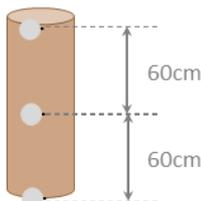
Code 4



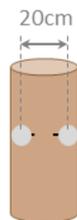
Code 5



Code 6

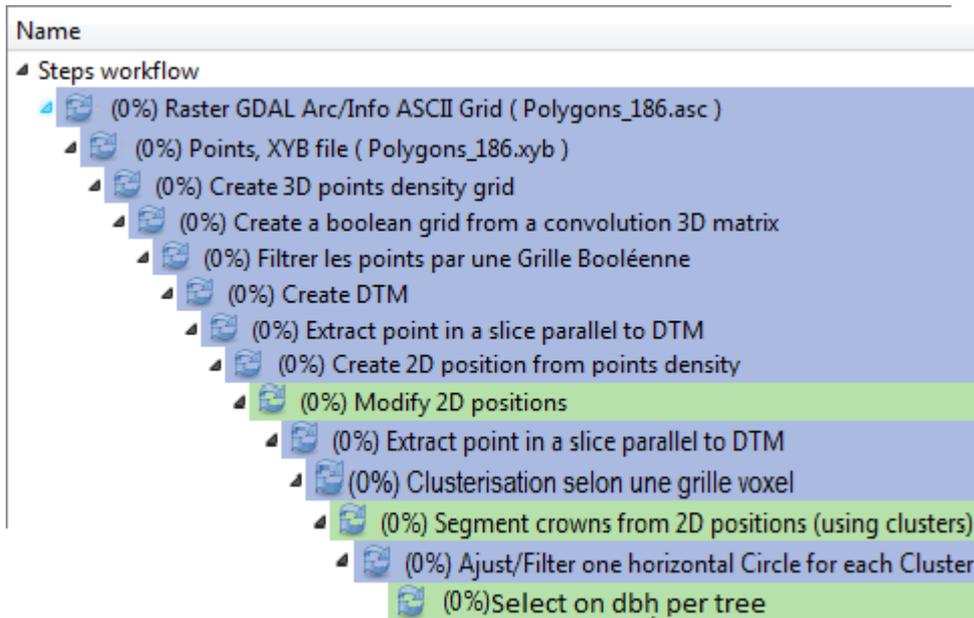


Code 7



Code 8

## Annexe 7 : Détail des étapes de CompuTree pour la détermination du diamètre et de la position



En bleu : étapes automatiques.

En vert : étapes manuelles.

## Annexe 8 : Script R utilisé pour la reconnaissance automatique des espèces

```
##### Lilian DUBAND - ONF RDI Chambéry - Juin 2016 #####
```

```
# Reinitialisation de l'environnement
rm(list=ls())
dev.off(dev.list()[ "RStudioGD" ])
cat("\014")

# Chargement du fichier dxf contenant les coordonnées des sphères exportées depuis Scene
dxf <- read.table(choose.files(caption = "Choisissez votre fichier .dxf exporté depuis FARO SCENE", multi = FALSE, filters = cbind("Fichier dxf (*.dxf)", "*.dxf")), skip=141)

##### Paramétrisation #####

# Periodicite du fichier : nombre de ligne correspondant aux informations pour une sphère
P <- 62

# Rv : rayon du cylindre de regroupement vertical des spheres (m)
Rv <- 0.15
# Rhe : rayon extérieur du cylindre de regroupement horizontal des spheres (m)
Rhe <- 0.3
# Rhi : rayon intérieur du cylindre de regroupement horizontal des spheres (m)
Rhi <- 0.10
# Zh : hauteur du cylindre de regroupement horizontal des spheres (m)
Zh <- 0.2
# Sh : seuil de séparation de hauteur entre 2 sphères proches (0.2m) et 2 sphères éloignées (0.6m) (m)
Sv <- 0.4
# Re : rayon du cylindre d'exclusion des doublons de spheres (m)
Re <- 0.5
# Zh : hauteur du cylindre d'exclusion des doublons de spheres (m)
Ze <- 2
# Dmin : distance minimale entre 2 sphères (m)
Dmin <- 0.1

## Translation
# Tx : décalage selon x
Tx <- 0
# Ty : décalage selon y
Ty <- 0
# Tz : décalage selon z
Tz <- 0

# Calcul du nombre de sphères
N <- floor(nrow(dxf)/P)

## Extraction des informations pour chaque sphère
# Initialisation
spheres <- data.frame()
for (k in 0 : (N-1)){
  nom <- as.character(dxf[k*P+3, 1])
  X <- as.numeric(as.character(dxf[k*P+7, 1]))
  Y <- as.numeric(as.character(dxf[k*P+9, 1]))
  Z <- as.numeric(as.character(dxf[k*P+11, 1]))
  R <- as.numeric(as.character(dxf[k*P+25, 1]))
  tmp <- data.frame(nom,X,Y,Z,R)
  colnames(tmp) <- c("nom","X","Y","Z","R")
  spheres <- rbind(spheres,tmp)
}
row.names(spheres) <- NULL
spheres$nom <- as.character(spheres$nom)

# Suppression des doublons
spheres$doublons <- duplicated(spheres$nom)
indices <- c()
for (j in 1 : nrow(spheres)){
  if (spheres$doublons[j]){
    indices <- c(indices, j)
  }
}

spheres <- spheres[-indices,]
spheres <- spheres[, -6]
row.names(spheres) <- NULL
# Suppression des sphères de calage FARO de 14cm de diamètre
```

```

spheres <- spheres[spheres$R == 0.04,]
spheres <- spheres[, -5]
#### Appariement des sphères ####
# Initialisation des colonnes de détection
spheres$code1 <- 0
spheres$code2 <- 0
spheres$code3 <- 0
spheres$code4 <- 0
spheres$code5 <- 0
spheres$code6 <- 0
spheres$code7 <- 0
spheres$code8 <- 0

# Initialisation du tableau des arbres
arbres <- data.frame(matrix(ncol = 8, nrow = nrow(spheres)), row.names=NULL)
colnames(arbres) <- c("X", "Y", "Z", "Code", "Sphere1", "Sphere2", "Sphere3", "Pb_App")

# Exclusion des doublons de sphères non supprimés pas SCENE
i=0
while (i < nrow(spheres)){
  i=i+1
  # Vecteur des indices des sphères
  V <- 1 : nrow(spheres)
  print(i)
  nom_exclu <- c("")
  # Sélection des valeurs de la sphère étudiée
  spheres$Xi <- spheres$X-spheres$X[i]
  spheres$Yi <- spheres$Y-spheres$Y[i]
  spheres$Zi <- spheres$Z-spheres$Z[i]
  spheres$XYi <- (spheres$Xi^2+spheres$Yi^2)^0.5

  # Sélection des sphères trop proches de cette sphère
  for (v in V[-i]){
    if ((spheres$Xi[v]^2+spheres$Yi[v]^2+spheres$Zi[v]^2)^0.5 < Dmin){
      nom_exclu <- c(nom_exclu, spheres[v,1])
    }
  }

  # Initialisation du vecteur de sélection horizontale
  Sexclu <- spheres[i, c(1:4)]

  for (l in V[-i]){
    # Sélection des sphères avec alignement horizontal
    if ((spheres$XYi[l] < Re) & (abs(spheres$Zi[l]) < Ze/2)){
      Sexclu <- rbind(Sexclu, spheres[l, c(1:4)])
    }
  }

  if (nrow(Sexclu) == 2){
    if ( (abs(Sexclu$Z[2]-Sexclu$Z[1]) < Zh/2) & (((Sexclu$X[2]-Sexclu$X[1])^2+(Sexclu$Y[2]-Sexclu$Y[1])^2)^0.5 < Rhi) ){
      nom_exclu <- c(nom_exclu, Sexclu$nom[1])
    }
  }

  if(nrow(Sexclu) >=4 ){
    # Calcul des distances entre les sphères
    Sexclu$D1 <- 0
    Sexclu$D2 <- 0
    Sexclu$D3 <- 0
    Sexclu$D4 <- 0
    Sexclu$D5 <- 0
    Sexclu$D6 <- 0
    for (k in 1 : nrow(Sexclu)){
      for (m in k : nrow(Sexclu)){
        Sexclu[m, 4+k] <- ((Sexclu[k,2]-Sexclu[m,2])^2+(Sexclu[k,3]-Sexclu[m,3])^2+(Sexclu[k,4]-Sexclu[m,4])^2)^0.5
      }
    }
    # Arrondi des distances au mm
    Sexclu[, 2:ncol(Sexclu)] <- round(Sexclu[, 2:ncol(Sexclu)],3)
    # Recherche de distances égales

```

```

# double boucle dans la matrice des distances pour rechercher les égalités
for (n in 1 : nrow(Sexclu)){
  for (o in n : nrow(Sexclu)){
    for (p in 1 : nrow(Sexclu)){
      for (q in p : nrow(Sexclu)){

        # Sélection des couples de sphères avec la même distance
        if ((Sexclu[o, n+4] == Sexclu[q, p+4]) & Sexclu[o, n+4] != 0){
          if ((o != q) & (n != p)) {

            # Export des numéros des sphères d'un des deux doublons, à supprimer dans la table générale
            if (Sexclu$Z[o] > Sexclu$Z[q]){
              nom_exclu <- c(nom_exclu, Sexclu$nom[o], Sexclu$nom[n])
            }else{
              nom_exclu <- c(nom_exclu, Sexclu$nom[q], Sexclu$nom[p])
            }

          }
        }
      }
    }
  }
}

# Suppression des doublons des numéros de sphères à supprimer
nom_exclu <- unique(nom_exclu)
if (nom_exclu[length(nom_exclu)] != ""){
  print(paste("Exclusion finale : ", nom_exclu ))
}

# Suppression des sphères doublonnées dans la table principale
spheres <- spheres[!spheres$nom %in% nom_exclu, ]
}

row.names(spheres) <- NULL

for (i in 1 : nrow(spheres)){
  # Sélection des valeurs de la sphère étudiée
  spheres$Xi <- spheres$X-spheres$X[i]
  spheres$Yi <- spheres$Y-spheres$Y[i]
  spheres$Zi <- spheres$Z-spheres$Z[i]
  spheres$XYi <- (spheres$Xi^2+spheres$Yi^2)^0.5

  # Initialisation du vecteur de sélection verticale
  Sverti <- spheres[i, c(1:12)]
  # Initialisation du vecteur de sélection horizontale
  Shori <- spheres[i, c(1:12)]

  # Sélection des sphères selon les alignements verticaux ou horizontaux
  for (l in V[-i]){
    # Sélection des sphères avec alignement vertical
    if ( spheres$XYi[l] < Rv){
      Sverti <- rbind(Sverti, spheres[l, c(1:12)])
    }
    # Sélection des sphères avec alignement horizontal
    if ((spheres$XYi[l] < Rhe) & (spheres$XYi[l] > Rhi) & (abs(spheres$Zi[l]) < Zh/2)){
      Shori <- rbind(Shori, spheres[l, c(1:12)])
    }
  }
}

# Incrémentation du tableau des arbres
if (nrow(Sverti) >= nrow(Shori)) {
  spheres_tmp <- Sverti[order(Sverti$Z,decreasing=TRUE),]
}else{
  spheres_tmp <- Shori[order(Shori$Z,decreasing=TRUE),]
}

# Coordonnées
arbres$X[i] <- spheres_tmp$X[1]
arbres$Y[i] <- spheres_tmp$Y[1]
arbres$Z[i] <- spheres_tmp$Z[1]
# Sphères
arbres$Sphere1[i] <- spheres_tmp$nom[1]
if (nrow(spheres_tmp) >= 2){
  arbres$Sphere2[i] <- spheres_tmp$nom[2]
}
if (nrow(spheres_tmp) == 3){
  arbres$Sphere3[i] <- spheres_tmp$nom[3]
}

```

```

# Attribution du code à chaque sphère
if (nrow(Shori) >= 2){
  spheres[spheres$nom %in% Shori$nom, ]$code8 <-1
  arbres$Code[i] <- 8
}
if ((nrow(Sverti)==1) & (nrow(Shori)==1)){
  spheres[spheres$nom %in% Sverti$nom, ]$code1 <-1
  arbres$Code[i] <- 1
}
if (nrow(Sverti)==2){
  if (abs(Sverti$Z[2]-Sverti$Z[1]) < Sv){
    spheres[spheres$nom %in% Sverti$nom, ]$code2 <-1
    arbres$Code[i] <- 2
  }else{
    spheres[spheres$nom %in% Sverti$nom, ]$code3 <-1
    arbres$Code[i] <- 3
  }
}
if (nrow(Sverti)==3){
  # Tri des sphères selon leur altitude
  Sverti[order(Sverti$Z,decreasing=TRUE),]
  if( ((Sverti$Z[1]-Sverti$Z[2]) < Sv) & ((Sverti$Z[2]-Sverti$Z[3]) < Sv) ){
    spheres[spheres$nom %in% Sverti$nom, ]$code4 <-1
    arbres$Code[i] <- 4
  }
  if( ((Sverti$Z[1]-Sverti$Z[2]) > Sv) & ((Sverti$Z[2]-Sverti$Z[3]) < Sv) ){
    spheres[spheres$nom %in% Sverti$nom, ]$code5 <-1
    arbres$Code[i] <- 5
  }
  if( ((Sverti$Z[1]-Sverti$Z[2]) < Sv) & ((Sverti$Z[2]-Sverti$Z[3]) > Sv) ){
    spheres[spheres$nom %in% Sverti$nom, ]$code6 <-1
    arbres$Code[i] <- 6
  }
  if( ((Sverti$Z[1]-Sverti$Z[2]) > Sv) & ((Sverti$Z[2]-Sverti$Z[3]) > Sv) ){
    spheres[spheres$nom %in% Sverti$nom, ]$code7 <-1
    arbres$Code[i] <- 7
  }
}
}
}

# Suppression des doublons dans le tableau des arbres
arbres$doublons <- duplicated(arbres$Sphere1)
indices <- c()
for (j in 1 : nrow(arbres)){
  if (arbres$doublons[j]){
    indices <- c(indices, j)
  }
}

arbres <- arbres[-indices,]
arbres <- arbres[, -9]
row.names(arbres) <- NULL

# Vérification de l'appariement
spheres <- spheres[, c(1:12)]
spheres$nbcode <- spheres$code1+spheres$code2+spheres$code3+spheres$code4+spheres$code5+spheres$code6+spheres$code7+spheres$code8

# Détection des sphères avec problème d'appariement
spheres_litige <- spheres[(spheres$nbcode > 1)|(spheres$nbcode == 0),]

if (nrow(spheres_litige) > 0){
  arbres[arbres$Sphere1 %in% spheres_litige$nom,]$Pb_App <- "Litige"
}

# Translation
arbres$X <- arbres$X+Tx
arbres$Y <- arbres$Y+Ty
arbres$Z <- arbres$Z+Tz

write.table(arbres, choose.files(caption = "Choisissez le répertoire d'export et le nom du fichier des sphères", multi = FALSE, filters = cbind("Fichier
txt (*.txt)", "*.txt")), sep="\t", row.names=FALSE)

```

## Annexe 9 : Notice opérationnelle de traitement de l'espèce des arbres au T-LIDAR

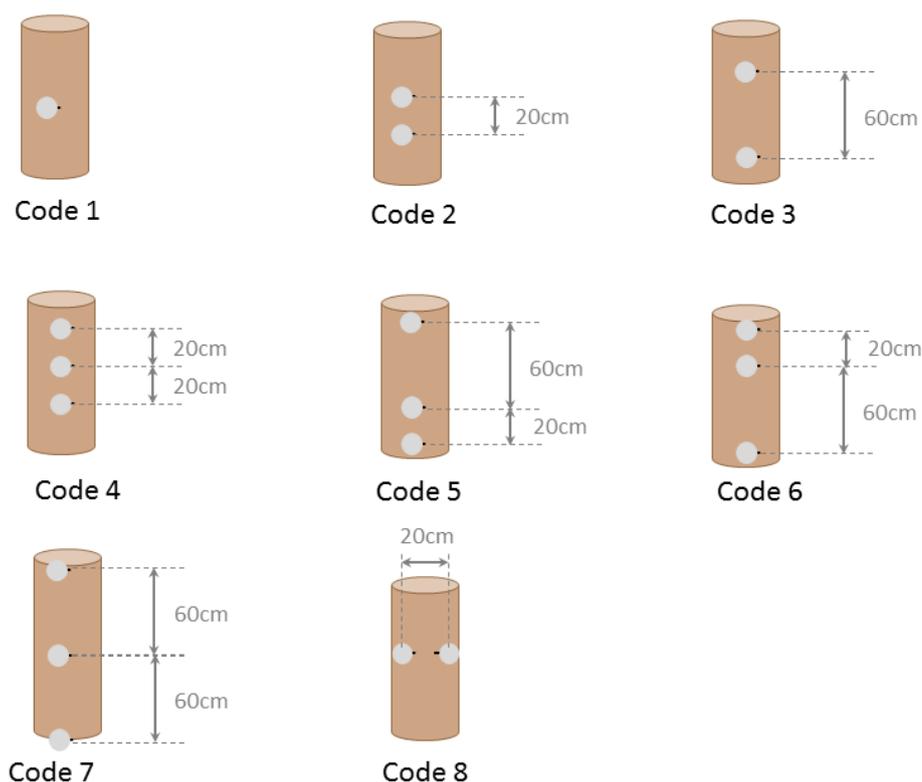
### Reconnaissance automatique des essences au LIDAR terrestre

La reconnaissance automatique des essences forestières sur un scan obtenu par LIDAR terrestre n'est pas encore développée. Il existe des travaux de recherche sur l'aspect de l'écorce mais ils ne sont pas encore utilisables.

En attendant, il est possible de détecter les essences de manière automatisée. Il suffit de placer de petites sphères en polystyrène sur les arbres, avec un motif différent pour chaque essence. Un logiciel détecte ensuite automatiquement les sphères et, en fonction du motif, en déduit l'essence.

#### Étape 1 : le positionnement des sphères sur le terrain

8 motifs ont été développés, ce qui permet de différencier jusqu'à 9 essences si l'on en laisse une en abandon. Les motifs sont les suivants :



Il est important de bien respecter les distances entre les sphères dans un motif (5cm de marge d'erreur) pour qu'il n'y ait pas d'erreur lors de la détection automatique.

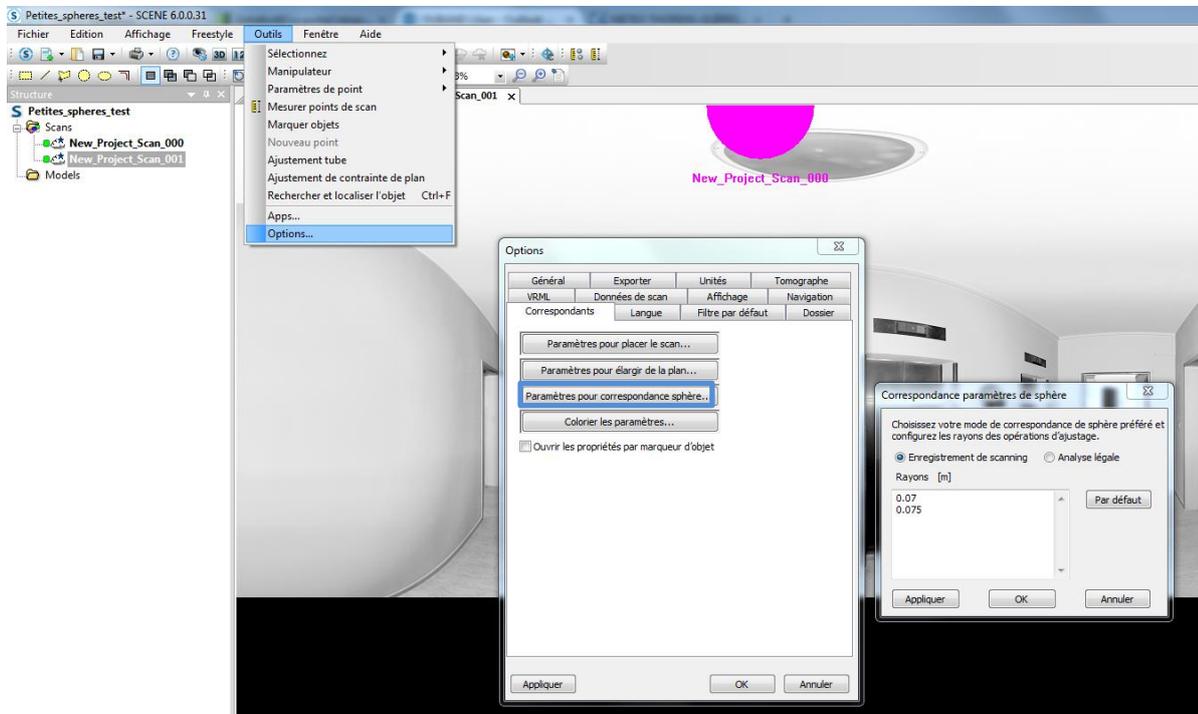
La hauteur du motif sur l'arbre n'a par contre aucune importance tant que celui-ci est visible depuis le scanner ; il peut aussi bien être à la souche qu'à 2m de hauteur sur le tronc.

Les sphères en polystyrène utilisées ont un diamètre de 8cm. Elles sont correctement visibles à moins de 15m du scanner. Il faut donc bien s'assurer au moment de placer les sphères que celles-ci sont correctement visibles et à moins de 15m du scanner.

## Etape 2 : le traitement des données

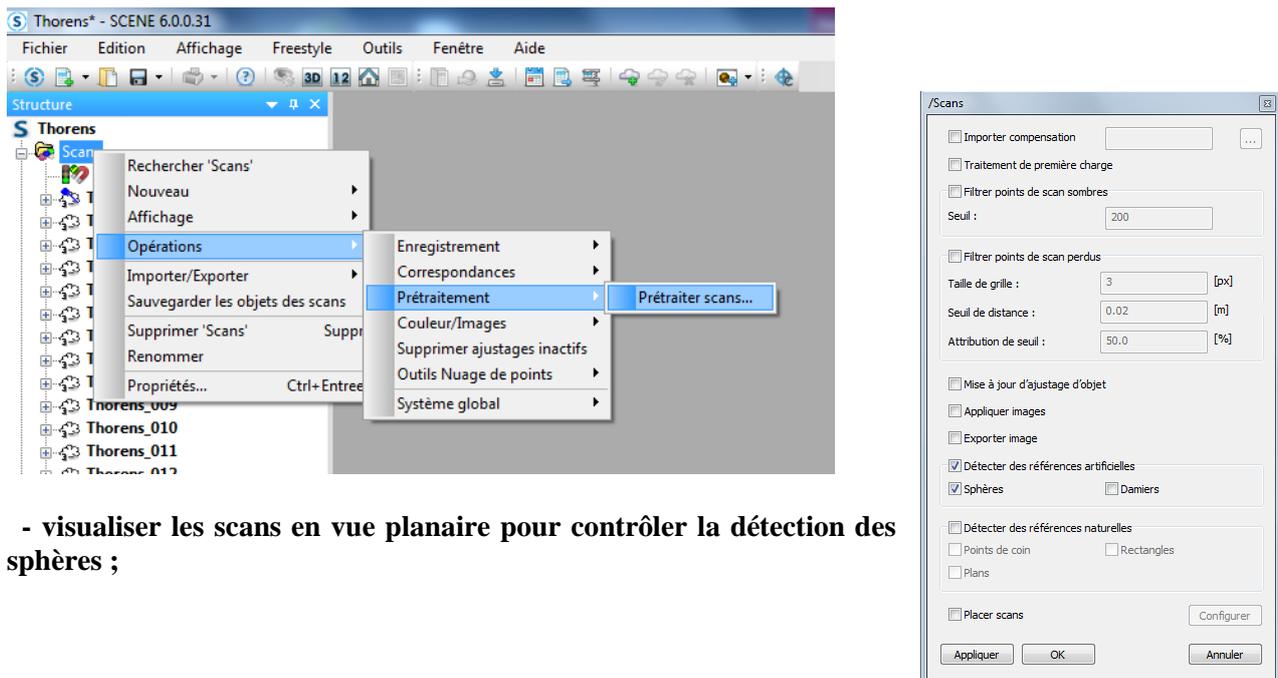
Traitement des scans LIDAR dans le logiciel FARO® SCENE.

Vérifier en premier les dimensions des sphères détectées automatiquement :

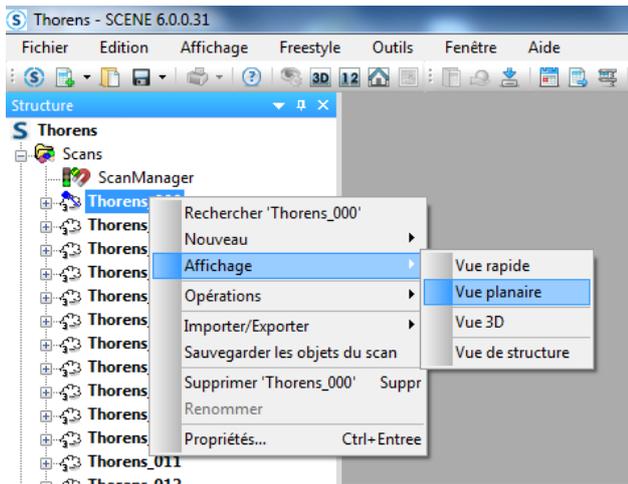


Réaliser les traitements suivants :

- importer les scans dans le logiciel FARO® SCENE en faisant glisser le dossier .fls dans le cadre de gauche ;
- lancer le prétraitement des scans en choisissant uniquement la détection des sphères ;



- visualiser les scans en vue planaire pour contrôler la détection des sphères ;



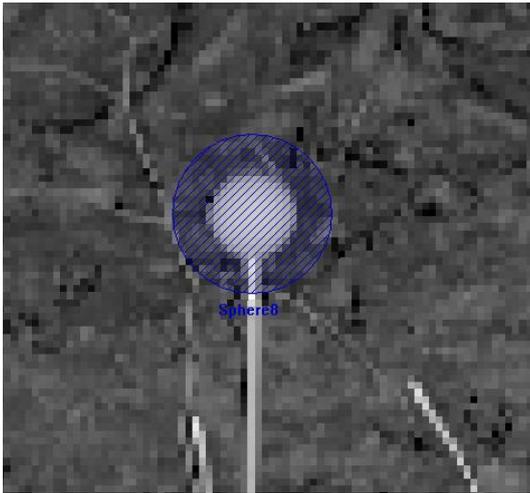
- vérifier la bonne détection de chaque sphère et supprimer les sphères détectées qui n'en sont pas en réalité ;



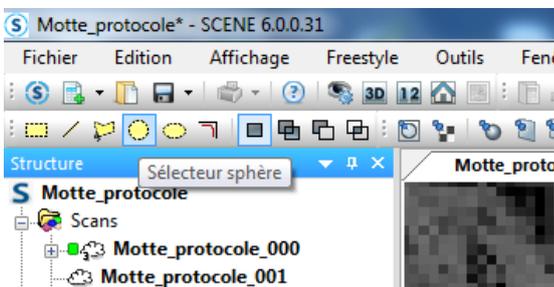
Deux sphères bien détectées



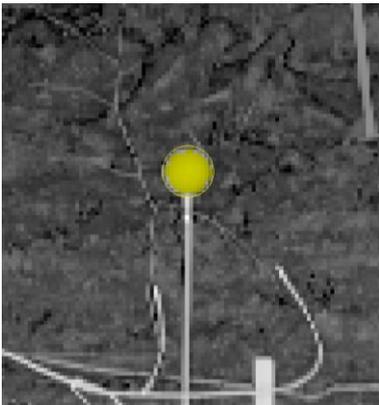
Une sphère « inventée » qui doit être supprimée



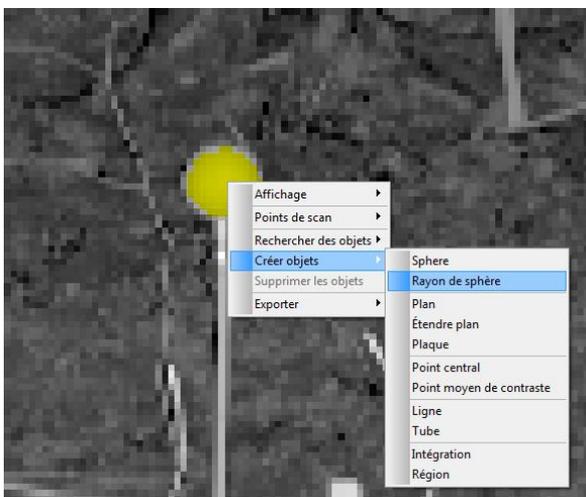
Une sphère mal détectée, qui doit d'abord être supprimée puis recrée avec le bon diamètre



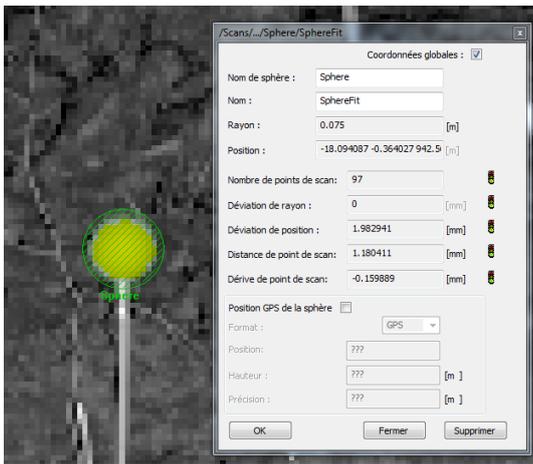
Choisir l'outil de sélection de sphère



Sélectionner graphiquement la sphère



Créer un rayon de sphère

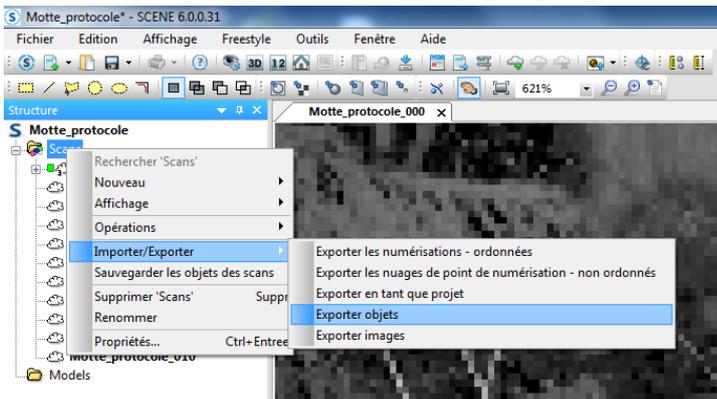


Valider la nouvelle sphère

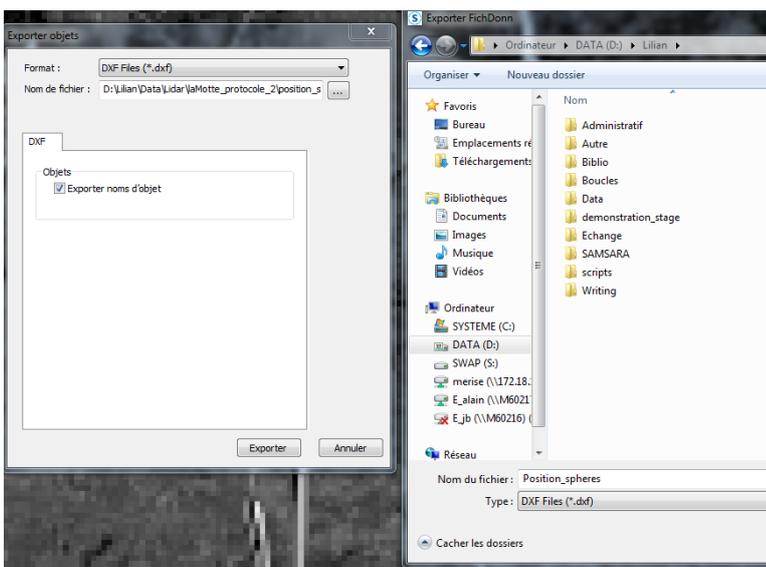
Si des sphères n'ont pas été détectées automatiquement, il est possible de les créer manuellement de la même façon.

La détection des sphères a des limites : si elles sont trop loin du scanner il n'y aura pas assez de points à leur surface pour qu'elles puissent être détectées.

**- exporter la position des sphères ;**



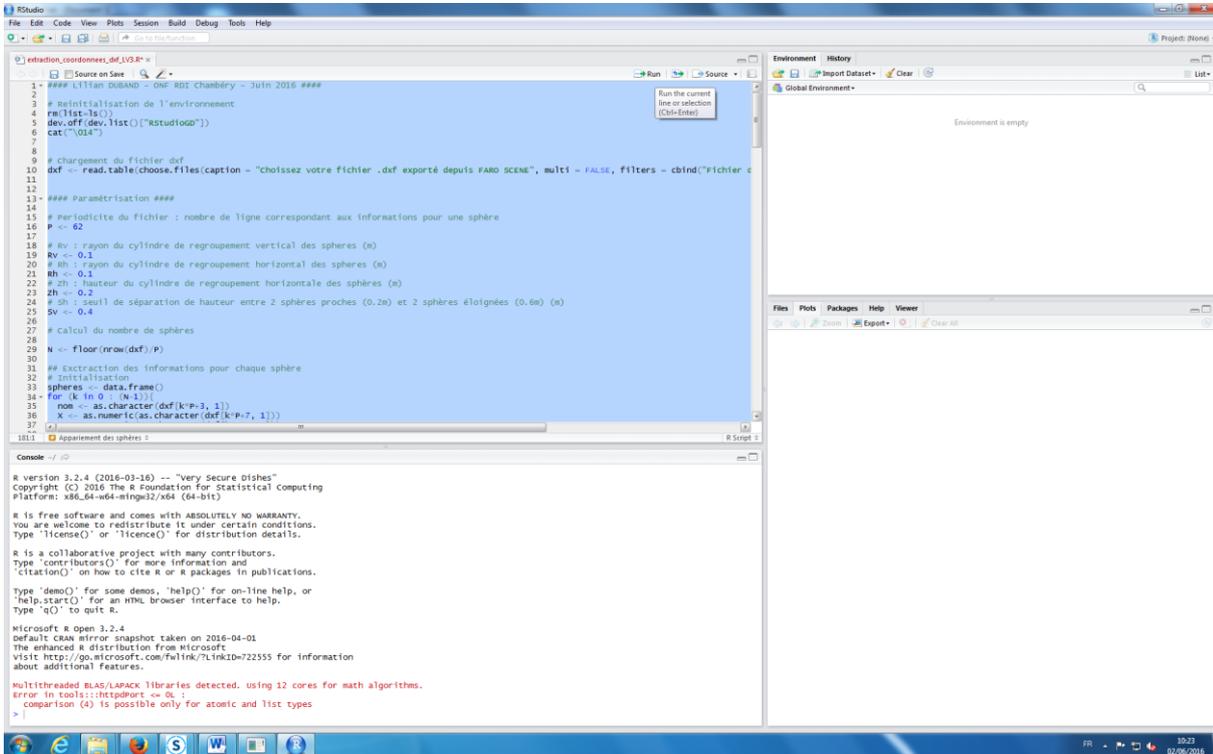
**- choisir un export avec l'extension .dxf puis choisir l'emplacement et le nom du fichier.**



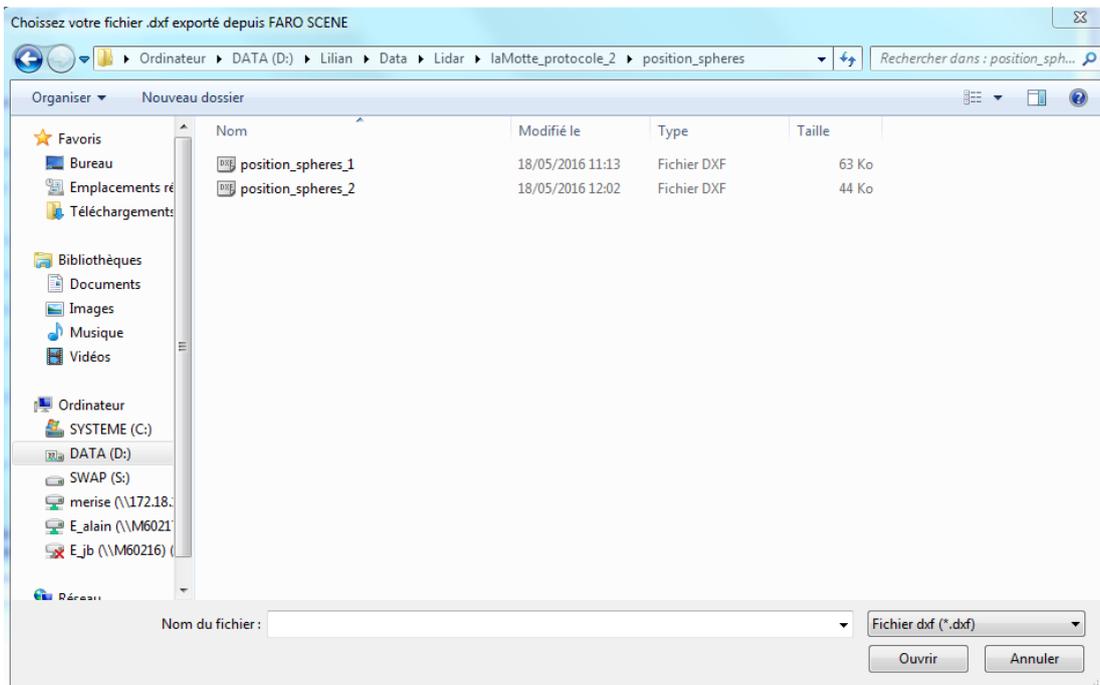
## Extraction des coordonnées des arbres associées au code essence correspondant.

- ouvrir le script `extraction_coordonnes_dxf_LV4.R` dans le logiciel R ou bien dans son interface RStudio ;

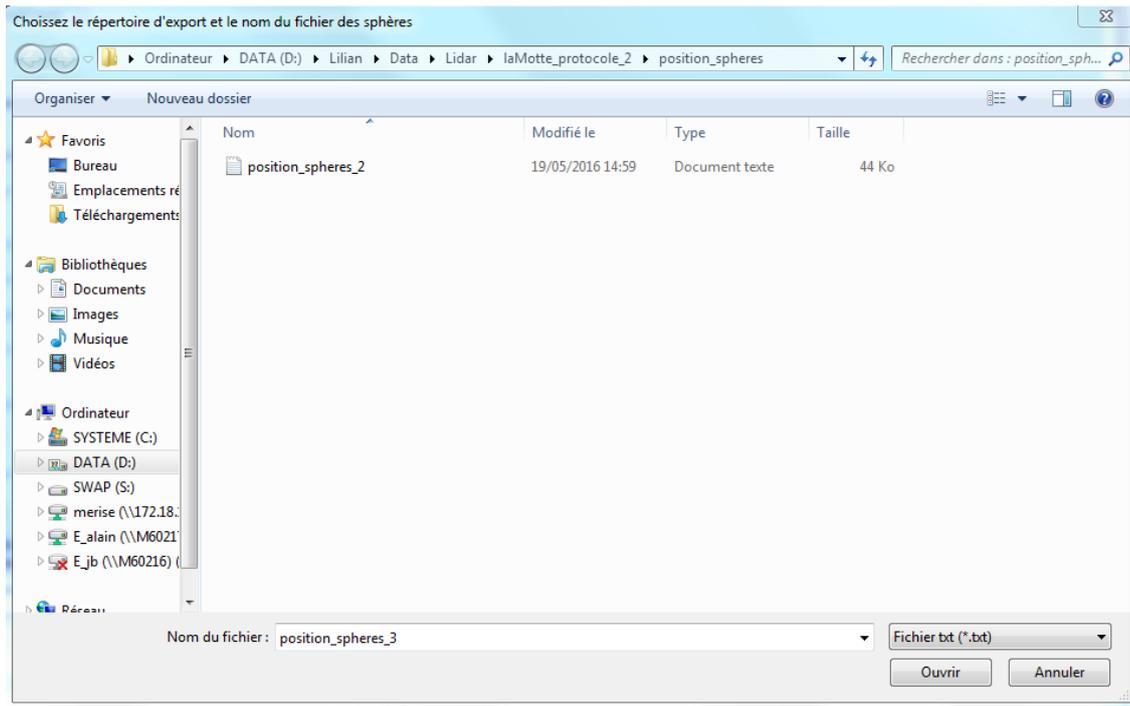
- lancer la totalité du script (tout sélectionner puis appuyer sur *RUN* dans RStudio ;



- sélectionner dans la fenêtre le fichier `.dxf` qui vient d'être créé ;



- sélectionner l'emplacement et le nom du fichier résultat dans la nouvelle fenêtre ;



- ouvrir le fichier généré pour vérifier le traitement.

"X"	"Y"	"Z"	"Code"	"Sphere1"	"Sphere2"	"Sphere3"	"Ph_App"
2.2198	-7.9704	930.5163	2	"Sphere1"	"Sphere2"	NA	NA
-0.5289	-6.8021	929.6471	2	"Sphere4"	"Sphere1"	NA	NA
-12.2421	-9.2317	929.317	2	"Sphere3"	"Sphere41"	NA	NA
-14.1601	-8.8765	929.9875	2	"Sphere39"	"Sphere30"	NA	NA
-4.3952	-1.8914	928.0167	1	"Sphere5"	NA	NA	NA
-3.6428	7.1751	929.61	3	"Sphere16"	"Sphere17"	NA	NA
2.4855	4.1019	930.2272	2	"Sphere19"	"Sphere20"	NA	NA
8.2665	5.8516	932.5533	2	"Sphere23"	"Sphere22"	NA	NA
1.5047	-0.2367	929.961	1	"Sphere14"	NA	NA	NA
5.2716	-2.1607	930.9947	2	"Sphere25"	"Sphere26"	NA	NA
-2.1803	10.6987	931.0821	3	"Sphere6"	"Sphere8"	NA	NA
-15.4692	4.4396	936.5138	1	"Sphere9"	NA	NA	NA
-3.3789	5.89	929.377	3	"Sphere32"	"Sphere10"	NA	NA
-13.1835	-2.1071	928.193	3	"Sphere15"	"Sphere18"	NA	NA
-22.0044	-11.0365	930.7759	2	"Sphere24"	"Sphere27"	NA	NA
-19.2743	-5.4808	929.0676	2	"Sphere29"	"Sphere28"	NA	NA
-16.3067	2.5882	928.6984	3	"Sphere35"	"Sphere36"	NA	NA
-33.6324	-4.4874	930.0185	1	"Sphere34"	NA	NA	NA
-25.2053	-5.276	929.244	1	"Sphere37"	NA	NA	NA
-28.3651	-2.8411	929.9203	3	"Sphere38"	"Sphere43"	NA	NA
-26.8988	-6.5076	929.2878	3	"Sphere42"	"Sphere40"	NA	NA
-34.4897	-10.141	930.8199	2	"Sphere51"	"Sphere47"	NA	NA
-29.8258	0.7045	-0.2657	2	"Sphere49"	"Sphere49"	NA	NA
-29.8258	0.7045	-0.2657	2	"Sphere49"	"Sphere48"	NA	NA
-30.4346	-12.4092	930.4984	3	"Sphere55"	"Sphere50"	NA	NA
-33.4527	-8.8312	931.0749	1	"Sphere52"	NA	NA	NA
-37.8606	-18.1287	931.8703	1	"Sphere57"	NA	NA	NA
-23.3779	-32.4419	936.766	2	"Sphere58"	"Sphere59"	NA	NA
-30.6152	-30.1864	936.3456	2	"Sphere61"	"Sphere60"	NA	NA
-34.459	-25.8105	934.9272	1	"Sphere62"	NA	NA	NA
-21.9301	-25.2124	934.832	2	"Sphere63"	"Sphere64"	NA	NA
-22	-25.4062	935.6382	2	"Sphere65"	"Sphere70"	NA	NA
-20.4182	-32.4345	937.4691	1	"Sphere68"	NA	NA	NA
-15.9992	-35.1438	937.5732	1	"Sphere69"	NA	NA	NA
0.4596	-28.4171	936.9342	1	"Sphere73"	NA	NA	NA
-4.1482	-18.0218	934.4119	3	"Sphere76"	"Sphere77"	NA	NA
-3.7284	-33.6743	937.6898	1	"Sphere78"	NA	NA	NA
6.1465	-20.1349	935.4607	1	"Sphere80"	NA	NA	NA
6.8097	-23.832	936.3124	2	"Sphere90"	"Sphere81"	NA	NA
2.9378	-28.094	936.5538	1	"Sphere82"	NA	NA	NA
-1.7817	-21.9307	936.5376	1	"Sphere83"	NA	NA	NA

Organisation du fichier :

- X, Y, Z : coordonnées approximatives de l'arbre
- Code : code correspondant au motif de l'arbre, pour faire le lien avec l'essence
- Sphere1, Sphere2, Sphere3 : sphère(s) composant le motif (lien avec FARO® SENE)
- Pb\_App : signale s'il y a eu un problème d'appariement avec cet arbre.

En effet si les sphères n'ont pas rigoureusement été placées selon les distances prévues dans les motifs, il est possible qu'il y ait des erreurs d'appariement, c'est-à-dire qu'une sphère soit utilisée dans deux motifs différents.

Dans ce cas une vérification manuelle sur le scan doit être réalisée pour caractériser le bon motif et assigner le bon code à l'arbre.

Remarque : il est ensuite possible de faire le lien entre cette carte approximative des arbres et de leur essence avec une carte précise de la position des arbres et de leur diamètre obtenue avec le logiciel CompuTree, pour finalement avoir une carte position, diamètre et essence des arbres.

## Annexe 10 : Détail des étapes de SEGMA dans *CompuTree*



Paramètre	Objet / Valeur
Load_LAS	LAS_Z
PointsFilter_IR	Scène
Points_Filter_FC	2
Create_DTM_IR	Ground Points
Create_DTM_Res	25
Create_DTM_Int	O
Create_DTM_Int_Wind	50
Create_DTM_Smooth	N
Create_DTM_SmoothN	/
Create_DTM_NA2Min	O
Create_DSM_DHM_IR	Vegetation Points
Create_DSM_DHM_IR	DTM
Create_DSM_DHM_Int	O
Create_DSM_DHM_Int_Wind	30
Create_DSM_DHM_Na2Min	O
Replace_NA_2_0_IR	DHM
Pit_Filling_IR	Modified Raster
Pit_Filling_Depth	0,5
Up_Out_Remove_IR	Pits filled
Up_Out_Remove_Height	2
Gauss_Filt_IR	Raster filled
Gauss_Filt_Sigma	0,25

Detect_Max_IR	Filtered image
Detect_Max_Min_Height	8
Filter_Max_IR	Filtered image
Filter_Max_IR	Maximum
Filter_Max_Param_File	Rayon_exclusion_LV2
Watershed_IR	Filtered image
Watershed_IR	Filtered maximum
Watershed_Min_Height	2
Create_Rast_EC_IR	MNH
Create_Rast_EC_IR	Watershed
Analyse_Crop_Crowns_IR	Idcluster
Analyse_Crop_Crowns_IR	Mask
Analyse_Crop_Crowns_IR	Watershed
Analyse_Crop_Crowns_Threshold	80
Analyse_Crop_Crowns_OTSU_res	0,1
Filter_Max_Clust_Area_IR	DHM
Filter_Max_Clust_Area	4
Watershed_IR	DSM
Watershed_IR	Filtered maximum 2
Watershed_Min_Height	2
Create_Rast_EC_IR	MNH
Create_Rast_EC_IR	Watershed
Analyse_Crop_Crowns_IR	Idcluster
Analyse_Crop_Crowns_IR	Mask
Analyse_Crop_Crowns_IR	Watershed
Analyse_Crop_Crowns_Threshold	80
Analyse_Crop_Crowns_OTSU_res	0,1
Extract_points_crown_IR	Liste_readers/scene
Extract_points_crown_IR	Classified_points/Modified mask
2D_grids_IR	Modified clusters
Points_ID_item_IR	Isolated_clusters/extracted_grid
Attributes/Items_IR	Isolated clusters

## Annexe 11 : Détail des métriques utilisées dans les modèles

Type	Nom	Description
raster SEGMA	CrownArea	Aire de la couronne
	Eccentricity	Excentricité de l'ellipse ajustée sur la couronne
	Solidity	Rapport du nombre de pixels de la couronne sur celui de l'enveloppe convexe
	HtoAration	Rapport entre la hauteur et la surface de la couronne
	CVmax	Coefficient de variation des hauteurs
	CentroidShift	Distance 2D entre le centroïde et le centroïde pondéré par les intensités
	Vextent	Différence entre les hauteurs minimale et maximale du houppier
	CrRatio	Rapport entre l'extension verticale du houppier et la hauteur de l'arbre
	Diameter	Diamètre du cercle d'aire équivalente à celle de la couronne
	Circularity	Circularité de la couronne : rapport entre l'aire et le périmètre
Global nuage points	Nb_pts	Nombre total de points
	Nb_first	Nombre total de points first
	HRelF	hauteur moyenne pts first / hauteur totale
Pente 2D houppier	pen05	Pente 2D 50 cm depuis apex
	pen1	Pente 2D 1 m depuis l'apex
	pen2	Pente 2D 2 m depuis l'apex
	pen3	Pente 2D 3 m depuis l'apex
	pen4	Pente 2D 4 m depuis l'apex
	pen5	Pente 2D 5 m depuis l'apex
	conv05	Convexité de la pente à 50 cm de l'apex
	conv1	Convexité de la pente à 1 m de l'apex
	conv2	Convexité de la pente à 2 m de l'apex
	conv3	Convexité de la pente à 3 m de l'apex
	conv4	Convexité de la pente à 4 m de l'apex
	aire1	% Aire sous la courbe pente à 1 m de l'apex
	aire2	% Aire sous la courbe pente à 2 m de l'apex
aire3	% Aire sous la courbe pente à 3 m de l'apex	
aire4	% Aire sous la courbe pente à 4 m de l'apex	
aire5	% Aire sous la courbe pente à 5 m de l'apex	
Distribution points dans le houppier	nbptTI05F	Nombre de points first à moins de 50 cm de l'apex en altitude
	nbptTI1F	Nombre de points first à moins de 1 m de l'apex en altitude
	nbptTI2F	Nombre de points first à moins de 2 m de l'apex en altitude
	nbptTI3F	Nombre de points first à moins de 3 m de l'apex en altitude
	nbptTI4F	Nombre de points first à moins de 4 m de l'apex en altitude
	nbptTI5F	Nombre de points first à moins de 5 m de l'apex en altitude
	nbptTI975F	Nombre de points first au-dessus du 975e percentile de hauteur
	nbptTI95F	Nombre de points first au-dessus du 95e percentile de hauteur
	nbptTI90F	Nombre de points first au-dessus du 90e percentile de hauteur
	nbptTI85F	Nombre de points first au-dessus du 85e percentile de hauteur
	nbptTI80F	Nombre de points first au-dessus du 80e percentile de hauteur
	nbptTI75F	Nombre de points first au-dessus du 75e percentile de hauteur

Géométrie points	tpiTI05F	Distance verticale moyenne à l'apex points first 50 cm de l'apex en altitude	
	tpiTI1F	Distance verticale moyenne à l'apex points first 1 m de l'apex en altitude	
	tpiTI2F	Distance verticale moyenne à l'apex points first 2 m de l'apex en altitude	
	tpiTI3F	Distance verticale moyenne à l'apex points first 3 m de l'apex en altitude	
	tpiTI4F	Distance verticale moyenne à l'apex points first 4 m de l'apex en altitude	
	tpiTI5F	Distance verticale moyenne à l'apex points first 5 m de l'apex en altitude	
	tpiTI975F	Distance verticale moyenne à l'apex points first au-dessus p975e de hauteur	
	tpiTI95F	Distance verticale moyenne à l'apex points first au-dessus p95e de hauteur	
	tpiTI90F	Distance verticale moyenne à l'apex points first au-dessus p90e de hauteur	
	tpiTI85F	Distance verticale moyenne à l'apex points first au-dessus p85e de hauteur	
	tpiTI80F	Distance verticale moyenne à l'apex points first au-dessus p80e de hauteur	
	tpiTI75F	Distance verticale moyenne à l'apex points first au-dessus p75e de hauteur	
	amrTI05F	Angle moyen en radian points first à moins de 50 cm de l'apex en altitude	
	amrTI1F	Angle moyen en radian points first à moins de 1 m de l'apex en altitude	
	amrTI2F	Angle moyen en radian points first à moins de 2 m de l'apex en altitude	
	amrTI3F	Angle moyen en radian points first à moins de 3 m de l'apex en altitude	
	amrTI4F	Angle moyen en radian points first à moins de 4 m de l'apex en altitude	
	amrTI5F	Angle moyen en radian points first à moins de 5 m de l'apex en altitude	
	amrTI975F	Angle moyen en radian points first au-sus du 975e percentile de hauteur	
	amrTI95F	Angle moyen en radian points first au-sus du 95e percentile de hauteur	
	amrTI90F	Angle moyen en radian points first au-sus du 90e percentile de hauteur	
	amrTI85F	Angle moyen en radian points first au-sus du 85e percentile de hauteur	
	amrTI80F	Angle moyen en radian points first au-sus du 80e percentile de hauteur	
	amrTI75F	Angle moyen en radian points first au-sus du 75e percentile de hauteur	
	dhmTI05F	Distance horizontale moyenne à l'apex points first 50 cm de l'apex en altitude	
	dhmTI1F	Distance horizontale moyenne à l'apex points first 1 m de l'apex en altitude	
	dhmTI2F	Distance horizontale moyenne à l'apex points first 2 m de l'apex en altitude	
	dhmTI3F	Distance horizontale moyenne à l'apex points first 3 m de l'apex en altitude	
	dhmTI4F	Distance horizontale moyenne à l'apex points first 4 m de l'apex en altitude	
	dhmTI5F	Distance horizontale moyenne à l'apex points first 5 m de l'apex en altitude	
	dhmTI975F	Distance horizontale moyenne à l'apex points first au-dessus p975e de hauteur	
dhmTI95F	Distance horizontale moyenne à l'apex points first au-dessus p95e de hauteur		
dhmTI90F	Distance horizontale moyenne à l'apex points first au-dessus p90e de hauteur		
dhmTI85F	Distance horizontale moyenne à l'apex points first au-dessus p85e de hauteur		
dhmTI80F	Distance horizontale moyenne à l'apex points first au-dessus p80e de hauteur		
dhmTI75F	Distance horizontale moyenne à l'apex points first au-dessus p75e de hauteur		
Pénétrabilité du nuage de points	Pen05F	Pénétrabilité du houppier à moins de 50 cm de l'apex en altitude	
	Pen1F	Pénétrabilité du houppier à moins de 1 m de l'apex en altitude	
	Pen2F	Pénétrabilité du houppier à moins de 2 m de l'apex en altitude	
	Pen3F	Pénétrabilité du houppier à moins de 3 m de l'apex en altitude	
	Pen4F	Pénétrabilité du houppier à moins de 4 m de l'apex en altitude	
	Pen5F	Pénétrabilité du houppier à moins de 5 m de l'apex en altitude	
	Pen975F	Pénétrabilité du houppier au-dessus du 975e percentile de hauteur	
	Pen95F	Pénétrabilité du houppier au-dessus du 95e percentile de hauteur	
	Pen90F	Pénétrabilité du houppier au-dessus du 90e percentile de hauteur	
	Pen85F	Pénétrabilité du houppier au-dessus du 85e percentile de hauteur	
	Pen80F	Pénétrabilité du houppier au-dessus du 80e percentile de hauteur	
Pen75F	Pénétrabilité du houppier au-dessus du 75e percentile de hauteur		
modèle hauteur	pente_locP	Pente locale sur 5 m de rayon %	
	pente_locR	Pente locale sur 5 m de rayon Rad	
	H_apex	Différence d'altitude entre l'apex et le MNT	

## Annexe 12 : Valeurs des coefficients du modèle de prédiction de la hauteur (2)

```
lm(formula = Htot ~ H_apex + pente_locP, data = allo_hauteur)
```

Residuals:

```
  Min      1Q  Median      3Q      Max
-5.3904 -0.9374  0.0247  1.0788  4.8515
```

Coefficients:

```
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  3.35796   0.69282   4.847 3.15e-06 ***
H_apex       0.92619   0.02194  42.219 < 2e-16 ***
pente_locP  -0.04995   0.01234  -4.049 8.29e-05 ***
```

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1.682 on 147 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.9239, Adjusted R-squared: 0.9229

F-statistic: 892.4 on 2 and 147 DF, p-value: < 2.2e-16

## Annexe 13 : Valeurs des coefficients du modèle allométrique de prédiction du diamètre (3)

```
modHtot=nls(Diam ~ (a*(Hpred-1.3) - m / (Hpred-Hmax)), data=allo_diametre, algorithm="port", start=list(a=0.5,m=(8), Hmax=38), control=list(maxiter=1000, warnOnly=T))
```

Formula: Diam ~ (a \* (Hpred - 1.3) - m/(Hpred - Hmax))

Parameters:

```
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
a      1.81498   0.03570  50.838 <2e-16 ***
m     -0.72648   1.67738  -0.433  0.666
Hmax  35.96156   0.05885 611.121 <2e-16 ***
```

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 10.92 on 147 degrees of freedom