

Relevés en zones forestières, inventaire arbre pied à pied par analyse TOMOGRAPHIQUE d'un nuage de points structuré spatialement issu de lidar mobile terrestre : le projet TOMOFORET

Marcel Bariou (Ingénieur Brasnah sarl), Jérôme Louvet (Expert forestier AEF J. Louvet) et Papa Ciré Dimé (Ingénieur AEF J. Louvet), Marie Dusart-Lesieur (Spécialiste mesure forestière AEF J. Louvet), Antonin Mosser (Élève Master II IMERIR/CNAM Alternant AEF J. Louvet).

TOMOFORET est un projet industriel de transfert de technologie et de compétences, planifié sur trois ans mêlant recherche algorithmique et ingénierie technologique. Le présent article est un point d'étape à deux ans, il donne quelques résultats et développe essentiellement l'approche adoptée. Deux autres articles faisant, l'un le bilan de performance de nos mesures et traitements, l'autre l'évaluation de l'apport éventuel de l'IA dans le traitement de nos données seront publiés en 2025.

Mots-clés : Forêt, arbres, volume, diamètre, lidar, nuage de points, sections, pseudo-circulaire.

Résumé

La gestion des forêts a une longue histoire qui trouve ses racines au sein des sociétés féodales en France, il en va de même de par le monde quelles que furent les structures sociales et économiques. Les mesures et évaluations démarrèrent avec des moyens archaïques qui gagnèrent peu à peu en expertise et richesses par le retour d'expérience de générations de forestiers. Faisons un saut rapide dans l'histoire pour arriver au 20ème siècle qui vit l'éclosion de la photographie aérienne, de la photogrammétrie, de la spectrométrie et du satellite embarquant tout cela, emportant aussi radar et lidar. Tout ceci a permis une approche macroscopique très riche de l'univers forestier. Cependant au sol, sous la canopée, le mètre ruban comme le compas forestier restent des outils très prisés et cohabitent avec le satellite. Loin d'être obsolètes, ils sont, encore, largement utilisés et restent souvent l'arbitre pour calibrer tout type de télémessure, dès que l'on veut de la précision locale. Toutefois la technologie prend le pas mais le lien reste fort, de nouveaux instruments apparaissent s'inspirant fortement de ces outils de base. Cependant, leurs usages restent chronophages et limitent les surfaces mesurées, l'induction statistique à partir de ces mesures manuelles et observations de placettes (zone réduite d'échantillonnage forestier), associée à des tables de cubage apportent le bras de levier nécessaire pour l'estimation de grandes surfaces de peuplement. Comment améliorer cela en usant de nouvelles offres technologiques déclinées du lidar aérien ou satellitaire, pour introduire des outils plus efficaces de mesures ? C'est l'objet de ce qui suit.

En effet, l'identification automatique des arbres en forêt, à savoir : - leurs positions géographiques, - leurs attributs géométriques - leurs essences, de manière rapide, exhaustive et globale sur une zone, est un véritable défi. À ce jour, la simple détection d'arbre, l'identification de leur espèce restent un goulot d'étranglement pour les relevés par lidar aérien. Cette difficulté peut être réduite par des mesures au sol au moyen de Lidar fixe ou mobile

selon diverses mises en œuvre. Mais ceci n'apporte pas d'approche vraiment opérationnelle pour les acteurs quotidiens de la mesure forestière qui recherchent la précision, l'exhaustivité, la qualité, de la rapidité et cela sur une zone de peuplement moins étendue qu'elle soit équienne ou non à essence unique ou non. Notre approche, présentée ci-après, prend le contre-pied de ce qui était habituellement proposé, le relevé aérien, donc au-dessus de la canopée. Nous portons tout notre effort pour une exploitation optimale de relevés, par **lidar mobile terrestre**, sous la canopée. Notre cible est une zone de 1 hectare (10 000 m²), ou moins, pour des raisons explicitées plus loin. Ensuite nous pouvons compléter par des relevés aériens avec le même lidar, à quelques mètres au-dessus de la canopée pour tenter d'enrichir nos mesures, notamment la densité des points au sommet des troncs et le bénéfice d'un positionnement géographique centimétrique. Le couplage aux relevés terrestres se limite à l'hectare, à ce jour. Les apports d'imagerie dans le visible ou l'hyper-spectral, en matière d'essence, de stress hydrique ou sanitaire ne sont pas abordés ici. Notre base (quantum) d'étendue de mesures, au sol, est l'hectare forestier dont le peuplement peut rassembler de 300 à 1500 tiges, selon l'âge. Les mesures doivent respecter un protocole strict, afin de garantir la qualité du nuage de points relevé sur la zone. Les méthodes décrites, dans le présent article, présentent les modes d'obtention et de traitement des fichiers de mesures en sous bois par Lidar mobile terrestre, ou des fichiers générés de manière synthétique au moyen de notre simulateur de nuage de points. Nous introduisons les protocoles de relevés en forêts, nous donnons le mode d'organisation de nos données, le principe de suppression du bruit de mesure, le mode de localisation précise de chaque arbre individuel et l'extraction des attributs propres à chacun dont volume et hauteur de bois d'œuvre ou d'industrie. Notre approche repose sur une construction progressive de présomption de présence par un pipeline de traitement. Le traitement et la corrélation avec nos données aériennes, étant en cours de développement, sont seulement cités dans le présent article sans approfondissement. Nos travaux sont à la lisière de la recherche, et s'inscrivent pleinement dans

une perspective industrielle. Notre objectif est de mettre à disposition des acteurs de la protection et de l'exploitation forestière des outils automatiques d'inventaire et d'évaluation patrimoniale de la ressource forestière sur des zones limitées. Comme indiqué, l'unité maximale de surface inventoriée est l'hectare. Les niveaux de précision de nos calculs sont le cm, le cm², dans le cas de manipulation d'image le pixel représente indifféremment le cm, le cm² voire le cm³ selon l'attribut manipulé. En mesures locales nous atteignons une précision de quelques unités des niveaux cités. En mesure globale géographique nous restons dans un cube d'incertitude de 50 cm de côté. Nos objectifs sont limités à trois mesures sur chaque arbre: 1) la position géographique de l'arbre, 2) une collection de diamètres dont le d₁₃₀, 3) les volumes de bois d'œuvre et de bois d'industrie. L'application ciblée comme le projet dans son ensemble sont dénommés TOMOFORÉ.

Au-delà de nos travaux, la note de (1) l'Université de Sherbrooke donne un panorama synthétique des mesures possibles en forêt et notamment des attributs d'arbres.

La motivation du projet et de la recherche

Le projet de recherche et développement (R&D) décrit dans le présent article a permis d'assurer un transfert de technologie (mesures à base de lidar et traitement des données collectées) et de compétences (génie logiciel, calcul scientifique, traitement massif de données, programmation, architecture de systèmes d'information, gestion long terme de projet) vers une entreprise dédiée à l'expertise forestière depuis 30 ans peu familière de ces nouveaux savoir-faire. Aux compétences existantes sont agrégées de nouvelles compétences. **Ce projet de R&D s'inscrit totalement dans une perspective industrielle.** Balbutiant en 2018, modestement entretenu ensuite, le projet connaît une très forte activité depuis novembre 2022 et cette première étape se terminera en novembre 2025 pour une mise en service opérationnelle. L'article couvre les aspects scientifiques et techniques de la démarche, mais n'ignore en rien les aspects humains, de formation et de gestion qui accompagnent ce parcours.

Organisation de l'article

La présentation respecte la chronologie de nos travaux de recherche et développement. Mais tout en présentant les résultats et les solutions obtenues il met également en avant les zones d'ombre et les difficultés qui subsistent afin de porter les efforts nécessaires dans ces domaines dans le court terme.

L'article est organisé en plusieurs chapitres très brefs, offrant une vue globale et séquencée du projet :

Un **préambule** rappelle les ordres de grandeur des précisions de mesure attendues.

Le chapitre 1 donne l'historique de nos travaux vu le caractère marginal et quasi accidentel de leur démarrage.

Le chapitre 2 est une bibliographie sommaire, donnant des similarités de recherche, en inscrivant nos propres travaux dans une activité née à l'aube des années 2000 et qui se développe progressivement depuis 2015 avec une accélération des publications depuis 2020. Cependant, vu les modalités de notre travail qui s'inscrit dans une perspective industrielle, la faiblesse initiale de nos liens académiques dans le domaine, nous découvrons des similitudes avec nos approches que nous indiquons en soulignant les emprunts le cas échéant tout comme les perspectives présentées que nous jugeons pertinentes par rapport à nos attentes. Il se conclut par un état des lieux en 2023 de nos propres travaux.

Le chapitre 3 donne le mode commun de conduite des inventaires forestiers à ce jour, comme la mesure d'attributs d'arbre.

Le chapitre 4 présente l'approche que nous proposons pour automatiser les inventaires forestiers pied à pied.

Le chapitre 5 donne le cadre de conduite des relevés des mesures et des développements de notre projet.

Le chapitre 6 introduit le développement des outils de simulation de fichiers *.las qui permettent essentiellement de prendre en compte les occultations, en offrant des bases simulées de peuplement par des troncs uniquement. C'est un apport de données calibrées pour les tests.

Le chapitre 7 présente la totalité de la plateforme technologique mise en œuvre pour la conduite de notre développement.

Le chapitre 8 introduit la notion d'extraction et d'exclusion d'un fichier de points de relevés afin de travailler sur la seule zone utile d'intérêt.

Le chapitre 9 traite des modes de relevés, en soulignant leurs limites et porte l'accent sur la nécessité du contrôle des parcours de relevés pour

l'obtention d'une bonne homogénéité de points d'écho sur les pourtours des troncs.

Le chapitre 10 présente la construction SLAM ses problématiques liées à la durée des relevés et aborde la volumétrie des données.

Le chapitre 11 explique la structuration géométrique du jeu de données en mémoire lors des traitements, selon un décliné d'octree.

Le chapitre 12 présente la coupe tomographique du nuage de point global, les options 2D et 3D pour une analyse sous forme d'image ou de nuage de points de sections d'arbres donc de listes de points.

Le chapitre 13 aborde la suppression du bruit des tomographies, par comparaison de coupes tomographiques successives en élévation, ou de manière semi-automatique.

Le chapitre 14 explore la construction d'amas de points par voisinage, ils sont représentatifs de présomption forte de sections de troncs. Une première carte position et diamètre des amas est établie.

Le chapitre 15 ces amas étant reconstitués, en fait des sections d'arbres, ils font l'objet de calculs attributaires : position au sol dans le nuage de points et diamètre équivalent. Cependant des bruits résiduels générant de faux arbres subsistent, ils sont supprimés.

Le chapitre 16 est relatif au traitement individuel des arbres, les positions au sol de présomption d'arbres étant connues, il est aisé d'extraire le nuage de points de chaque arbre individuel du nuage global et de conduire une traque, depuis la souche, du barycentre des sections échantillonnées le long du tronc et cela jusqu'au fin bout du bois du bois fort (7cm de diamètre).

Le chapitre 17 aborde les méthodes de calibration de mesures, associant relevés manuels traitement semi-automatique et tentative d'identification de régularités dans les croissances selon l'allométrie des arbres.

Le chapitre 18 traite le mode de présentation des résultats finaux, synthèse de l'ensemble des informations extraites.

Le chapitre 19 donne le cadre final d'intégration de l'application en fin 2024.

Le chapitre 20 aborde la mise en œuvre possible des résultats dans le cadre d'un inventaire plus global.

Le chapitre 21 décrit les modes de gestion de projet adoptés dans cette opération de transfert de technologie.

Le chapitre 22 introduit des méthodes de relevés et de calibration qui devront répondre à un besoin d'amélioration des calculs de volume.

Le chapitre 23 introduit quelques éléments de validation : diamètre à 1.30m , position, distance.

Le chapitre 24 liste les informations issues de nos relevés et traitements.

Le chapitre 25 donne les caractéristiques principales des lidars utilisés.

Le chapitre 26 donne nos conclusions sur le réalisé. Elles synthétisent les aspects satisfaisants, soulignent les faiblesses de nos approches et proposent une orientation de nos travaux immédiats pour y pallier et améliorer les performances et la fiabilité de notre outil d'inventaire automatique TOMOFORÉ.

Le chapitre 27 donne les perspectives d'activités en 2025 pour le reste à faire.

Une bibliographie donne les références des documents cités et des notes internes pertinentes issues du développement

Préambule : la précision des mesures d'arbres

En matière académique un ouvrage de référence dans l'espace francophone est celui de J. Randoux (2) . Par ailleurs, on s'appuie également sur les travaux de H. E. Burkhart (3). Tous deux déclinent de manière assez exhaustive le panorama de la mesure forestière des peuplements et des arbres. Concernant l'estimation des volumes, l'ouvrage adopté, par beaucoup, en France pour la mesure forestière, est « Le tarif de cubage à décroissances variables pour les arbres sur pied » de M. Pierre Chaudé (4). Il respecte la norme française B. 53-015 définissant le cubage dit au réel. Dans le mode d'emploi du tarif (Cubage de quelques arbres sur pied) il est précisé et nous citons : 1) Mesurer au ruban forestier gradué ou au compas leurs circonférences de base, à 1m30 du sol, à **5 cm près par excès ou par défaut**. 2) Évaluer leur hauteur en bois d'œuvre, à **1 m près**. Ce rappel positionne les précisions de mesure attendues dans la foresterie à ce jour. Nous ajouterons, pour notre part, qu'à l'instar du tarif Chaudé nous prenons en compte, de manière implicite, la structure conique des grumes, la

décroissance métrique moyenne, mais sans simplification aucune en matière de calcul. Par ailleurs, en terme de calibration de mesures, afin d'être aussi proche que possible de la réalité, nous conduisons en permanence un apprentissage de celles-ci, par relevés manuels réguliers. Cela permet de corriger les biais et les dérives qui peuvent apparaître dans la reconstruction S.L.A.M (« Simultaneous Location And Mapping »), liée aux techniques de mesures par lidar mobile produisant des nuages de points, ceci manquant d'homogénéité voire de densité sur les objets forestiers détectés.

Chp1-Historique et origine des travaux

Le point de départ de nos travaux fut l'analyse et le traitement de fichiers de relevés de lidar mobile terrestre concernant la Réserve Naturelle Nationale de la forêt de la Massane (R.N.N. la Massane), effectués en 2016. Ce relevé terrestre fut associé à un relevé aérien. Il s'agit d'une hêtraie de 330 ha, située dans les Pyrénées Orientales à la frontière franco-espagnole (voir localisation plus bas fig. 1). Une superficie de 10 ha, totalement protégée, fait l'objet d'un suivi scientifique depuis plus de 100 ans.

Les travaux de notre présente recherche, héritent d'une première investigation qui fut possible par la mise à disposition de ces données de mesure LIDAR

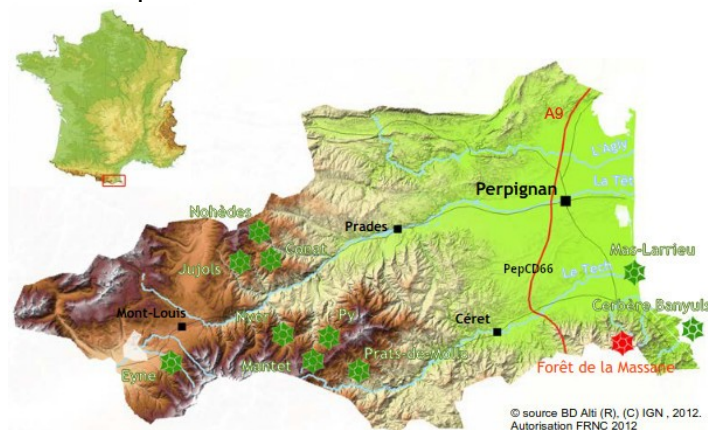


Figure 1 : Localisation des relevés (La Massane, Pépinière PepCD66) (Geoslam Zeb-Revo) au format *.las, par la Réserve Naturelle Nationale de la Massane en fin 2018. Ces relevés furent effectués en mode aérien par l'entreprise SINTEGRA en 2016 et en sous-bois par l'entreprise EXAMETRICS en 2016 au moyen du Lidar Zeb Revo. Ces premiers travaux (7) nous permirent de valider la possibilité, sur des zones arborées allant jusqu'à l'hectare de surface (300 à 500 arbres), d'extraire sur cette zone la position de chaque arbre, leur nombre et leur diamètre à hauteur de 1m30. La portée modeste du Zeb-Revo (15m) nous permit néanmoins d'aborder la problématique de volumétrie jusqu'à des élévations sur 4 à 5 mètres sur le bois d'œuvre de certains troncs, malgré la faible

qualité du nuage de points. Ces travaux soulignaient la faisabilité possible tout en manquant de précision sur les mesures et de portée en distance en matière de relevés. Mais ils suffirent pour nous convaincre, l'évolution technologique aidant, d'un futur possible de l'emploi de tels outils dans le cadre de l'automatisation des inventaires forestiers. Notre approche initiale fut celle de néophytes, sans compétences spécifiques ni historique dans la télémessure laser, donc un apprentissage c'est imposé. Ce n'est qu'à partir de 2019/2020 sur la base de recherches bibliographiques, que nous apprîmes quelques antériorités dans le domaine et la rareté des travaux sur le sujet (relevé en sous bois par lidar mobile terrestre). Bien sûr l'usage de la télémessure lidar satellitaire ou aérienne était très actif mais tout se passait au-dessus de la canopée (occultant fortement les troncs), un inventaire précis s'avérait impossible par cette voie. Cependant les premières approches par lidars fixes apparaissaient pour tenter d'évaluer les placettes (400 à 600 m²) mais elles restaient extrêmement chronophages et peu adaptées à l'exploitation quotidienne. Notre ambition était la couverture dendrométrique exhaustive de l'hectare en 15 mn (relevé, traitement SLAM, traitement dendrométrique), ce qui est encore impossible aujourd'hui, l'objectif demeure ; l'obstacle principal est le traitement S.L.A.M. Aujourd'hui, en excluant la construction S.L.A.M nous en sommes à 30 mn pour 500 arbres [4s par arbre]. Nous poursuivîmes nos travaux avec des moyens très modestes jusqu'à la fin 2022. En novembre 2022 nous prîmes la décision de nous engager sur ce développement, à l'initiative de la société d'expertise forestière A.E.F J. Louvet sise à Pézilla la Rivière dans le département des Pyrénées Orientales en France. Notre objectif était et reste très circonscrit : fournir pour chaque arbre sur des zones d'exploitation pouvant atteindre 7000 m² (~400 arbres) :

- sa position géographique à ± 25 cm,
- son diamètre échantillonné par pas de 10 cm sur une hauteur de 6 m au plus, mais pouvant monter jusqu'à 25 m grâce à un filtre de poursuite barycentrique associé à une régression polynomiale cubique.
- son volume de bois d'œuvre jusqu'à une hauteur de 6 m au plus, dans l'attente d'une automatisation de l'identification fiable du début du houppier, en cours de développement, ou la qualification finale de nos interpolations polynomiales pour obtenir le diamètre fin-bout.

Ne disposant, fin 2022, que de notre seul fichier historique, notre première préoccupation fut de créer notre propre simulateur de nuages de points associant :

- un modèle de scène forestière stylisée, paramétrable,
- un modèle de lidar 16 canaux simulant le ZEB Horizon (quaternion de positionnement, temps de vol et tracé de rayon pour gérer les occultations),
- un outil de création de modèle de parcours,
- un générateur de fichier *.las.

Pour ce simulateur, bien que satisfaisant pour nos premiers besoins il nous faut reconnaître que l'absence :

- de la simulation d'une centrale inertielle à base de technologie MEMS (gyroscopes, accéléromètres, magnétomètres),
- de la simulation de la reconstruction SLAM , affaiblit la qualité de notre génération de fichier *.las, qui ne souffre pas du bruit de calcul de convergence de la construction SLAM. Faute de la connaissance des caractéristiques statistiques de ce dernier en fin 2022, début 2023, nous nous sommes contentés de l'ajout d'un bruit gaussien centré sur la position de chaque écho simulé, sans doute insuffisant, mais qui permet néanmoins de tester nos algorithmes, du fait du caractère calibré de nos données obtenues par simulation.

Ainsi durant l'année 2023 nous disposions de notre propre générateur de fichier *.las (ASPRS LAS format (version 1.0-1.3)) prenant en compte les occultations des illuminations lidar suite à un parcours prédéfini au sein d'une scène arborée que nous paramétrons, complétée par l'ajout du bruit simulé de mesures (gaussien centré) et des modèles en librairie de zone bruitées non simulées.

En 2024 grâce à l'acquisition d'un lidar mobile terrestre FARO-GEOSLAM Zeb-Horizon, nous disposons maintenant d'un jeu extrêmement varié de relevés en forêt, que ce soit des surfaces arborées jusqu'à 6000 m², ou des arbres individuels. A ceci nous avons ajouté des relevés sur poteaux conico-circulaire afin de faciliter nos travaux de calibrations nécessaires.

La visualisation des fichiers *.las est effectuée au moyen de CloudCompare (Licence LGPL & GPL version 2.0). Les extractions SLAM (Simultaneous Location And Mapping) des données Zeb-Horizon sont effectuées par le logiciel FARO Connect qui nous

fournit le fichier de relevé au format *.laz ainsi que les données de trajectographie. Des règles strictes du positionnement du LIDAR en phase de relevé, associées à quelques relevés de distance nous facilitent grandement la gestion des objets forestiers comme des zones entières dans le repère euclidien sol de référence de chaque relevé individuel de zone. A l'issue de la fourniture SLAM, les traitements sont effectués par des logiciels développés par nos soins sur la base de nos propres algorithmes, ils sont fondés essentiellement sur des coupes tomographiques des nuages de points voxelisés à des résolutions variables associées à des techniques de tri KnD et Knn et des projections sur des plans 2D. Les seules librairies tierces utilisées sont LibLas (Licence B.S.D) pour les lectures et écriture en fichiers, LasTools (Licence L.G.P.L) pour des contrôles, des validations de données ainsi que les opérations de compression et de décompression de fichiers *.las, *.laz. En terme de présentation graphique, nous mettons en œuvre des outils graphiques GnuPlot ou MatplotCpp. Tout nos développements son conduits en C++. Notre approche est essentiellement déterministe et géométrique dénommée « Géométrie faible bruit », même si nous avons démarré des essais d'apprentissage profond au moyen de YOLO permettant de confirmer certaines estimations. Bien entendu nous prenons en compte les incertitudes statistiques propres à nos mesures comme à nos calculs. L'un des critères de nos travaux est la rapidité de traitement, tout nos développements sont conduits sur des stations de travail d'au moins 18 cœurs (Usage de openMPI sous licence MIT), doté d'une carte NVIDIA dans le but d'un transfert aisé vers de gros centres de calculs, dès que le volume de données à traiter le nécessitera dans l'avenir.

Chp2 - Evaluation bibliographique sommaire

Un panorama du démarrage des activités lidar en forêt, présentant surtout les perspectives ouvertes, est donnée jusqu'en 2004 dans la synthèse de « ASPRS Annual Conference Proceedings May 2004 »(8). Notamment il est évoqué l'usage du lidar en foresterie dès 1997, par Erik Naesset en Norvège, sans aller jusqu'à la volumétrie des arbres il identifie leur présence et leur position, également il est fait référence au professeur Ackerman, spécialiste de la photogrammétrie, qui soulignait l'intérêt du Lidar aérien pour l'évaluation des modèles numériques de terrain en foresterie, le taux de pénétration d'un balayage lidar en absence de feuilles était de l'ordre de 70 à 80 %. Ce sont effectivement des approches fondatrices pour l'investigation dimensionnelle en forêt. Les travaux correspondants soulignaient d'une manière visionnaire les écueils à franchir dans le

domaine pour les années à venir : - 1) envisager des modèles de filtrage pour discriminer les caractéristiques du sol, - 2) reconnaissance morphologique des structures, reconnaissances d'objet - 3) parvenir à fournir rapidement des modèles de terrain aux systèmes d'information géographiques comme à la correction des informations LIDAR, - 4) fusion avec des données d'imagerie en enrichissant la photogrammétrie classique, - 5) rigueur de la calibration et du traitement des données pour une fourniture de données utiles à la foresterie. En 2002 sont évoqués par Naesset : - 1) la géomorphologie du terrain, - 2) les possibilités d'analyse de la structure forestière, - 3) l'analyse individuelle des arbres.

En septembre 2003 l'Université suédoise des sciences agronomiques hébergeait le « ScandLaser scientific workshop on airborne laser scanning of forests" (Hyypä, J. et al, 2003) et posait les problématiques de l'usage du lidar dans les sciences environnementales et forestières : 1) histoire et état de l'art en Scandinavie, 2) paramétrage des systèmes, modèles et algorithmes, 3) application en écologie, 4) évaluation des changements, 5) application en inventaire forestier, 6) usages et méthodes d'étude sur un arbre élémentaire. Ainsi beaucoup de possibilités furent évoquées, hauteur d'arbre, diamètre, modèle de terrain, gestion forestière, mais ce fut sans conséquence immédiate en terme d'applications avec peu de référence d'applications forestières à grande échelle (8). En 2004 cette technologie nourrissait peu d'attractivité pour le futur vu son coût de mise en œuvre, seul Naesset en Norvège entretenait la flamme.

Franchissons une décennie, une étude européenne (9) (10) avec 18 partenaires des pays ressortissants de l'Union Européenne, lancée en 2014, publiée en 2020 par Euro Spatial Data Research fait un état des lieux de la mesure par Lidar en sous bois sur le continent européen (La France étant représentée par l'I.G.N. et l'O.N.E.R.A.). On y voit apparaître tout l'intérêt de la mesure en sous-bois et corrélativement on devine la nécessité de rendre **mobile** le lidar fixe en effectuant les relevés en forêt au pas de marche. Sans l'indiquer clairement, l'étude fait le pari sur les progrès rapides des technologies dans le domaine. Cette étude conclut « *En ayant évalué les forces et les faiblesses des télémesures lidar en forêt (sous-bois) et la capacité des algorithmes à extraire les attributs d'arbre des nuages de points lidar, les résultats de cette étude sont un guide pour les travaux ultérieurs dans le domaine* ». Nous avons simplement anticipé leur souhait en entamant nos travaux expérimentaux dès

2017 avec des moyens modestes, mais en exploitant des données de LIDARs mobiles terrestres. Aussi en mettant en œuvre en sous bois des lidars mobiles terrestres des domaines d'applications apparaissent : il y a un grand besoin de valider la robustesse de l'évaluation des capacités forestières (biomasse) que ce soit au niveau des peuplements, des placettes forestières et des arbres en atteignant progressivement des évaluations plus précises. Descendre au niveau de l'arbre individuel n'est plus une utopie cf. (7) au niveau des territoires et des régions en y intégrant également une gestion et une comptabilité fine de la de la séquestration du carbone.

Ceci pose toute la problématique de la mesure LIDAR qui, avec son apport en mesure terrestre, gagne en précision mais perd en capacité extensive de surface de territoire pour des raisons de coûts liés aux durées des relevés. Comment franchir l'écueil du coût, comment apporter de la précision de manière extensive, pour trancher les débats précédents ? Est-on capable de construire de grandes surfaces boisées par l'agrégation de ces petites zones mesurées, hectare par hectare ? Offre-t-on simplement de plus grandes placettes ?

Comment apporter un réel service aux acteurs du terrain : les forestiers, les réseaux scientifiques de l'étude forestière, les structures de protection et de gestion environnementale et cela dans un contexte de changement climatique où le rôle de la forêt est si prééminent et parfaitement reconnu. L'entité forêt doit être pénétrée, tous ses objets individuels identifiés. Le lidar mobile terrestre le permet, mais sa couverture demeure modeste.

D'une observation globale (au sens du globe terrestre), macro, entamée par les outils satellitaires distants nous passons à une observation du détail, micro, de terrain où la mesure précise des objets à notre échelle devient une nécessité à généraliser jusqu'à l'arbre individuel. L'image nous a permis de passer à la photogrammétrie, 3D, mais le lidar, associé à un GPS ou à une centrale inertielle, nous apporte aujourd'hui instantanément cette mesure 3D, sous forme de nuage de points. Complétée par le survol aérien, elle permet de franchir l'écueil de l'occultation de la réception GPS en sous-bois, pour bénéficier de la précision centimétrique RTK du positionnement. Par sa précision, cette mesure doit devenir le cœur de notre approche pour la connaissance de la forêt et autour de laquelle nous pourrions ultérieurement accrocher et fusionner données et observations issues des sources les plus diverses. Mais il nous faut

d'abord progresser fortement dans les protocoles d'acquisition de données en foresterie sous la canopée, dans les méthodes de traitement de nuages de points issus de ces acquisitions tant en précision qu'en vitesse de calcul (7) (11). Ce n'est qu'ensuite que l'on pourra nourrir l'ambition de gérer finement de grands espaces forestiers que ce soit en terme d'inventaire forestier, et d'une manière plus qualitative d'identification d'objets forestiers, de suivi de la biodiversité, d'identification des habitats animaliers, d'évaluation d'essence, de stress hydrique ou sanitaire au sein des zones forestières. Pour l'instant notre approche reste circonscrite à la position de l'arbre, son diamètre et son volume de bois utile.

Chp3 – Inventaires forestiers aujourd'hui

Les inventaires forestiers s'appuient habituellement sur des relevés de placettes sélectionnées selon différents critères au sein d'un peuplement forestier. Des techniques diverses peuvent être mises en œuvre pour assurer les relevés attributaires. Ces attributs sont de natures quantitatives et qualitatives et mêlent tout autant la mesure, qu'une démarche de stricte observation et de comptage, l'ensemble permettant de qualifier la placette. Ensuite, sur la base d'induction statistique il est procédé à une évaluation de la zone globale de peuplement, abritant ces placettes de référence, débouchant entre autres sur des évaluations de surfaces terrières, de hauteurs attendues de peuplement, de volumes de bois disponible et autres attributs permettant de caractériser ces zone de peuplement rassemblant des dizaines d'hectares. Concernant les mesures, aujourd'hui elles sont conduites de manière relativement sommaire et concerne essentiellement le diamètre de l'arbre à 1.30m, sa décroissance, la hauteur de l'arbre par des approches empiriques et peu précises pour qualifier les peuplements de zones sous divers aspects : volume de bois, croissance potentielle, biodiversité, stockage carbone etc ...

Concernant l'exploitation forestière du bois, selon l'essence et l'estimation de l'âge du peuplement, des tables de cubage fruit d'une longue expérience de compilation de données, permettent d'établir ce que l'on appelle le tarif de cubage des bois sur pied. En France la norme B53 – 017 hérite de la norme historique B 53-015 homologuée le 31 mai 1945 et rendue obligatoire par l'arrêté ministériel du 17 avril 1947. C'est la méthode de cubage, dite au réel. Elle est la seule à être reconnue officiellement et reposant sur des prescriptions de l'AFNOR.

Chp4 -Une nouvelle approche

Les éléments présentés dans l'article sont de caractère strictement métrologique et apportent une nouvelle proposition en matière de mesures d'arbre sur une zone de peuplement. Ils s'appuient sur des relevés assurés en sous-bois forestier, donc sous la canopée, au moyen d'un lidar mobile terrestre par zone de 1 hectare au plus, à ce jour. Ces éléments proposent, dans le cadre d'un inventaire exhaustif de la zone relevée, des données arbre par arbre. Ces données rassemblent, pour le moins, pour chacun de ces arbres, la localisation géographique de chaque arbre dans la zone forestière, un échantillonnage de diamètres le long du tronc depuis la coupe au niveau de la souche à une coupe de 7 cm de diamètre au sommet de l'arbre (fin bout). On peut donc en déduire le volume de bois disponible dans la tige principale (le tronc), une évaluation de la qualité de rectitude du tronc par la calcul d'un rayon de courbure équivalent et de la flèche maximale de ce tronc. A cette fin, le relevé par lidar mobile terrestre porté par un opérateur fournit un nuage de points 3D qui subit un traitement spécifique totalement automatisé en respect des étapes présentées ci-après. Ce traitement fournit en sortie pour chaque arbre identifié, dans la zone relevée, les éléments donnés dans le tableau ci-dessous.

Table attributaire de zone arbre par arbre (C.S.V)							
Performances => Temps de calcul < 1s/arbre, précision / fiabilité voir ci-dessous							
Position	Diamètre à 1.30 m	Hauteur	Volume	Rayon courbure	Flèche	Essence	Stress
X, Y, Z	D	H	V	Rc	F	E	S
+/- 20cm	< ± 2 %	< ± 2 %	< ± 5 %	< ± 2 %	< ± 2%	↕ Fa < 15 %	↕ Fa < 15%

Figure 2 : Enregistrement *.csv de base pour chaque arbre

Nous y ajouterons des éléments qualitatifs issus de relevé aérien sur la même zone, avec éventuellement le même Lidar et des instruments optiques et/ou hyper-spectral porté par un drone aérien, mais nous ne développons pas l'addition de ces compléments dans le présent article, les travaux de développement étant en cours.

Chp5 - Le cadre des mesures et développements

Nos travaux s'appuient sur divers nuages de points au format *.las. Un premier nuage de points est issu de relevés effectués en 2016 dans la forêt de la Massane dans les Pyrénées orientales au moyen d'un lidar GEOSLAM ZEB-REVO. Ce nuage de points extrêmement bruité a constitué un matériau extrêmement intéressant pour nos approches de recherche de suppression de bruit. Par ailleurs, le caractère peu structuré de la forêt de la Massane a apporté un second défi pour extraire l'information de ce nuage de point, sans avoir le bénéfice de régularités géométriques que l'on retrouve, davantage, dans les

peuplements artificiels. Puis, nous avons utilisé des nuages de points issus de notre propre simulateur. Enfin, ayant acquis notre Lidar mobile terrestre, Faro-Geoslam Zeb-Horizon en fin 2023, nous disposons maintenant d'un jeu de données réelles pour conduire nos travaux de recherche et de développement.

Chp6 – Le simulateur Tomoforet

Le simulateur prend en charge 3 simulations : 1) le lidar Geoslam Zeb-Horizon, 2) la scène boisée, 3) le parcours du lidar dans la scène simulée.

Le lidar est simulé sous forme d'un éventail plan recevant 16 canaux laser séparés depuis le centre par des angles de 18 ° soit un angle global de 288°. L'éventail est soumis à un mouvement de rotation de 2Hz par rapport à son axe de symétrie. La cadence maximale de tir est de 300 KHz , l'activation simulée de chaque laser représente une période de 53µs. Le lidar simulé peut se déplacer dans la scène à une vitesse paramétrable allant de 0.5m/s à 4 m/s.

La scène boisée offre une maîtrise complète de la géométrie du peuplement, donc de la position des arbres, du relief de plantation, de la structure de forme de tronc : cylindrique, conique avec ou sans rayon de courbure du tronc. Il est possible d'ajouter du bruit en élévation, d'abord un bruit gaussien (en cas d'écho) sur le cône ou le cylindre représentatif du tronc, et un bruit complémentaire à diverses hauteurs , représentatif de feuilles, de branches, voire de pousses de cépées voisines, toutes susceptibles de générer des artefacts altérant la qualité d'imprégnation d'écho sur les troncs d'arbres, donc modifiant d'autant la densité de points d'écho simulé sur les troncs d'arbre. Ces bruits artificiels permettent d'évaluer la capacité de discrimination de nos algorithmes et leur précision de calcul. Cet ensemble de paramètres définit la scène de la zone boisée limitée à la prise en compte des seuls troncs pouvant éventuellement recevoir la simulation d'un branchage feuillu ou non. A cette fin les arbres peuvent recevoir à leur sommet une structure conique ou semi-sphérique dotée d'un coefficient de transmissivité (probabilité pour le tir lidar de franchir cette zone, à l'aller comme au retour). Cette structure simule les branches avec ou sans feuilles. Sa mise en œuvre accroît d'autant la dégradation de la densité des points d'écho. Chacune de ces fonctions est activée sur demande. Mais nous ne prenons en compte que les seuls échos illuminant le tronc.

Disposant de diverses formes et géométrie de scène nous avons la possibilité de construire un peuplement hétérogène de zone par tronc de forme cylindrique, conique rectiligne ou courbée en élévation. Le simulateur prend en compte les occultations des illuminations lidar, l'élargissement de la tache de diffraction comme la densité d'illumination (donc d'écho) en fonction de la distance d'illumination sur des zones de peuplement. Celles-ci sont définies, avec une structuration maximale, à raison de 25 arbres x 25 rangées , soit 11500 m², donc des espacements entre tronc de l'ordre de 5 m avec un écart type de 1 m. Le simulateur gère des diamètres de tronc allant de 20cm à 120 cm, jusqu'à des hauteurs de 30 m. Un peuplement peut être totalement homogène ou totalement hétérogène.

En matière de parcours nous pouvons adopter un parcours périmétrique de la zone ou un parcours inter-travée voire un mixage des deux.

Le traitement est basé sur l'algorithme de « lancé de rayon » (12) à base rectangulaire pour les arbres ou triangulaire pour les branches feuillues ou non. Il se fait tir par tir, la rapidité de l'exécution est liée à la qualité de la parallélisation du calcul.

Enfin, pour conclure sur le simulateur, outre sa capacité de modéliser (de manière toujours perfectible) un nuage de points de lidar mobile terrestre, il offre le grand avantage de fournir des données calibrées géométriquement. Ceci permet de qualifier les performances de notre chaîne de traitement à savoir la précision et la fiabilité des résultats de calcul fournis. C'est avant tout un outil de validation de nos algorithmes de calcul.

Chp7 – La plateforme technologique

La collecte des données terrestres en zone forestière est faite au moyen du lidar Faro-Geoslam Zeb-Horizon un seul écho utile par tir. La construction SLAM du nuage de points au format *.laz s'appuie sur Faro-Connect (sous le système d'exploitation Windows). Les relevés aériens ont été conduits au moyen d'un drone aérien DJI équipé du laser de balayage 5 échos ZenMuse L2. La construction du logiciel TOMOFORET objet de notre développement s'appuie sur :

- 3 plateformes Dell allant jusqu'à 18 cœurs sous le système d'exploitation Ubuntu 24.04 LTS, disposant de carte de calcul NVIDIA,
- une chaîne de développement libre C++ pour nos bibliothèques spécifiques,
- une intégration I.H.M avec Qt 6,

- la librairie libre LIBLAS pour les lectures écritures de fichiers *.las/*.laz,
- la librairie libre LASTOOLS pour des traitements de contrôle des fichiers *.las/*.laz produits,
- la librairie libre PDAL pour des besoins de visualisation et dans la perspective de travaux ultérieurs,
- les librairies MatPlotLibCPP et GnuPlot pour la présentation des résultats,
- le visualiseur libre de nuages de points *.las/*.laz CloudCompare,
- des outils classiques d'arpentage et de mesures en forêts : compas forestiers, mètre ruban, mire verticale de 5m, mire horizontale de 1m, GPS centimétrique, télémètre lidar, appareil photo Canon.
- la chaîne Jupyter et l'environnement scientifique Python 3.12 pour des approches d'apprentissage profond,
- L'environnement YOLO pour des approches d'apprentissage profond,
- les images spécifiques sont traitées sous le logiciel libre GIMP,
- le logiciel libre LibreOffice pour la préparation des documents,
- la base de données bibliographique pilotée par le logiciel libre Zotero,
- une politique de stockage des données de NAS Synology d'une capacité de stockage de 8 TB.
- L'ensemble des développements ciblant l'outil final est conduit en C++, la construction et les tests unitaires s'appuient sur CMake. Certains tests complémentaires sont mis en œuvre dans l'environnement Jupyter associé aux bibliothèques scientifiques Python.

Autant que faire se peut, l'usage privilégié des logiciels libres est une règle de conduite pour nos travaux et cela pour des raisons de coûts, de pérennité et d'indépendance.

Nous nous appuyons essentiellement sur Géoportail (<https://geoportail.gouv.fr>) pour localiser et identifier a priori, nos zones d'investigation et de collecte de données dans le département des Pyrénées Orientales en France.

Chp8 – Notion d'extraction et d'exclusion

Le lidar Zeb-Horizon porte jusqu'à 100m, en conséquence nous nous retrouvons avec un nuage final rassemblant des données bien au-delà de notre

zone d'intérêt. Généralement, celle-ci est centrale dans notre nuage de point. Donc pour le traitement nous devons éliminer le pourtour, nous définissons, par une liste de points, le polygone contenant notre zone d'intérêt. Ce dernier peut être concave ou convexe mais il doit être orienté dans le sens horaire de surcroît afin de respecter les règles de traitement TOMOFORET. Ce polygone définit la zone d'extraction utile et il doit être défini par une liste de points, dans le repère cartésien du relevé, donnant les sommets du polygone, cette liste doit obligatoirement être orientée de manière ordonnée pour ses sommets dans le sens horaire. Cette liste permet de construire un fichier *.csv contenant ces sommets ordonnés et orientés. De la même manière au sein de la zone extraite il peut être envisagé d'exclure des zones du traitement, essentiellement pour des raisons de présence de source potentielle de bruit, notamment en cas d'embroussaillement excessif. Elles sont définies par des zones polygonales orientées, et prises automatiquement en compte par le traitement TOMOFORET.

Chp9 – Collecte des données

Avant de se rendre sur site, pour tout relevé un travail minimum de préparation est nécessaire. En l'état actuel de nos développements, nous excluons les relevés sur les zones : 1) à fort embroussaillement, 2) où l'espacement entre arbre est inférieur à 2 m, 3) où les tiges de peuplement ont, essentiellement, un diamètre inférieur à 15 cm. Nos relevés sont conduits dans un référentiel sol dont nous définissons nous même l'origine et l'orientation du repère euclidien (Orientation nord pour l'axe OY est recommandé). Les travaux de préparation doivent pour le moins délimiter les zones à relever par fraction de 1 ha au plus, nous recommanderions a priori 5000 m². Par ailleurs un relevé préalable du profil altimétrique du terrain, donne une idée de la difficulté du parcours. Ceci conditionne la vitesse moyenne possible de marche pour l'arpenteur et par la même la surface maximale qu'il est possible de relever. Un arpenteur expérimenté saura évaluer lui-même le parcours optimal sur site, en respect des contraintes attendues, mais l'information préalable est toujours utile.

Un relevé de terrain doit obéir à certaines règles de parcours, dans la phase de collecte de données sur site, de façon à assurer une bonne qualité de données en matière de densité de points. Ceci est conditionné par la distance de relevé, la vitesse de déplacement, le chemin de parcours adopté, la durée du relevé. Plusieurs approches peuvent être envisagées. Il est recommandé de mettre en place des amers artificiels

ou d'identifier des amers naturels facilitant le repérage du parcours. La stratégie du parcours (périmétrique, quadrillage, trèfle, travée) doit être telle que l'arpenteur illumine au mieux avec son lidar l'ensemble des troncs d'arbres. Il n'y a pas de règle absolue, c'est lié à la configuration de la zone relevée. C'est l'expertise de l'arpenteur qui, à terme, fera la différence.

Si ce dernier a bien défini sa zone d'intérêt en identifiant les sommets du polygone d'extraction, il peut enregistrer ceux-ci, automatiquement, au cours de son relevé, en marquant un temps d'arrêt de 10 secondes à chaque position de sommet identifié. Afin de s'assurer de l'orientation correcte du relevé de ces sommets il est recommandé de terminer le relevé par un parcours périmétrique orienté. En, tout état de cause le parcours doit se terminer à son point de départ. Ceci est proposé à titre expérimental, les zones d'extraction peuvent être également définies au cours de la préparation des données.

Chp10 – Construction SLAM

L'appareil de mesure, Le lidar Zeb-Horizon, est doté d'une centrale inertielle (fournissant accélération et vitesse angulaire selon les axes) et effectue en outre une mesure de temps de vol pour chaque écho en retour (seul le 1^{er} écho est pris en compte). Un enregistreur portable reçoit l'ensemble de ces données, un premier fichier *.geoslam rassemble celles-ci (~5 Go en moyenne *.las pour 1 ha). Les données fournies sont des accélérations, des rotations et des mesures de temps de vol.

Avec ces données le processus S.L.A.M. permet de calculer la position [X,Y,Z], dans le référentiel de mesure, de chaque écho, en retour, aboutissant ainsi à la construction du fichier *.las/*.laz, environ 1.6 Go en *.laz pour 1 ha, soit en décompressé 5 Go (4 Go utiles après extraction). Ce fichier *.las rassemble les coordonnées des points d'écho dans le référentiel de l'appareil de mesure, c'est aussi le référentiel sol. Cette opération est effectuée par un logiciel propriétaire de FARO : CONNECT. Pour cette construction il faut compter 2 à 3 unités de temps de calcul par unité de temps de relevé, souvent plus. En résultat, outre le nuage de points d'écho, nous disposons également de la trajectographie du LIDAR durant la phase d'acquisition et dans le cas où l'arpenteur aurait enregistré le polygone d'exclusion un fichier dédié est également disponible. Enfin, chaque point d'écho recueilli construit une intensité du signal en réception, information non exploitée dans la présentation courante. Nous assurons le dépouillement d'une surface de 1 hectare,

afin d'optimiser la précision, suite à un parcours fermé et à plusieurs boucles croisées de parcours sur la zone mesurée. Ainsi, nous créons un premier couple de fichiers, le fichier du nuage de points global *.laz et le fichier d'extraction associé de la zone utile, que nous stockons tous deux ensemble. À cette étape, le jeu de données est conditionné pour être soumis à TOMOFORET qui va se charger de la suite du traitement.

La seule structuration initiale des données est temporelle, chaque point est daté, et collecté de manière séquentielle, sans qu'il y ait de relation de voisinage immédiat (structuration spatiale) entre deux points collectés consécutivement ou proches temporellement. La datation nous permettrait ultérieurement, le cas échéant, d'évaluer des dérives fonctionnelles des positionnements voire de les corriger, après calibration préalable de notre lidar. En effet, on peut constater parfois une totale déformation du nuage de points par rapport à la réalité. Ces dérives sont peut-être un peu liées à la montée en température des composants électronique assurant les fonctions gyrométriques et accélérométriques de la centrale inertielle du lidar, mais plus vraisemblablement elles sont l'effet du caractère itératif du traitement SLAM introduisant une propagation d'erreur de calcul, en phase de convergence lente, ou en présence du traitement de grands fichiers issus de durées de relevés trop longues. Comme le signale le constructeur, on peut être confronté à deux types d'erreurs par le traitement SLAM : 1) une erreur de biais, l'erreur est constante par unité dimensionnelle, 2) une erreur de glissement qui peut être spatiale, plus on s'éloigne du point origine plus l'erreur par unité dimensionnelle croît, ou qui peut être temporelle cette erreur croît avec la durée du traitement. La parade proposée est de limiter la durée du relevé. L'optimum serait de 15 minutes. Nous avons poursuivi jusqu'à des relevés de 27 minutes. On constate en distance proche (5 m) comme en distance lointaine (120 m) que les écarts relatifs de mesure restent inférieurs à 0.5 % (comparaison entre nos données calculées par TOMOFORET et les mêmes mesures effectuées manuellement sur zone).

Chp11 - Structuration du jeu de données

La première étape de traitement de TOMOFORET est l'extraction de la zone utile qui permet ainsi d'écarter un certain nombre de points d'écho sur la périphérie de notre relevé (cf § chp8). Il s'agit de conduire l'extraction (sur la base du fichier de la liste de points orientées) de la seule zone d'intérêt afin de limiter les traitements aux seuls arbres qui s'y trouvent. Ceci réduit d'autant le volume de données à traiter. La

donnée élémentaire du lidar mobile terrestre est le point défini par ses coordonnées, c'est à dire l'écho résultant d'une illumination lidar sur un obstacle (le tronc d'arbre est l'objet d'intérêt). Nous ne traitons que le premier écho en retour, c'est le seul fourni par Zeb-Horizon. Dans cette première phase de présentation nous nous abstenons de rentrer dans la complexité de la gestion du choix du système de référentiel de coordonnées géographiques. Nous y reviendrons ultérieurement. Nous nous en tiendrons à un repère euclidien xoyz classique qui est celui du repère sol établi à l'initialisation du lidar lors de chaque relevé. Ainsi, pour un point, nous assimilons respectivement la latitude, la longitude, et l'élévation au trois coordonnées X, Y, Z.

Notre objectif est d'aboutir à l'évaluation d'attributs géométriques, comme indiqué précédemment, sur notre tableau ciblé de résultats. En conséquence, il nous est nécessaire de restructurer nos données spatialement. Ceci sera assuré à la volée dès la première lecture de notre fichier de données sur disque dur et cela en deux étapes. Nous adoptons une déclinaison de l'algorithme Kd-Tree. Sans préjuger de l'encombrement spatial de notre nuage de points, pour chaque point nous disposons de ses seules coordonnées. À titre indicatif nous précisons que les éléments d'unités dimensionnels ne sont pas figés et restent tous parfaitement paramétrables. Ainsi, nous opérons sur une surface de terrain dont l'aire d'intérêt se limite à 1 hectare, nos mesures sur le territoire (France/Occitanie) se limitent à des arbres d'une hauteur maximale de 35 m, ceci donne un ordre de grandeur de l'encombrement spatial. Sur cette base, nous structurons notre espace par un maillage cubique spatial (cubes de 50 cm de côté), une opération simple sur les coordonnées du coin inférieur gauche de chaque cube nous permet de lui donner une identité unique. D'une manière identique la même opération conduite sur chaque coordonnées des points relevés, nous donne la même identité ce qui nous permet de ranger chaque point de l'espace dans son cube dédié. Par ailleurs ce maillage de l'espace se traduit par un carroyage au niveau du sol de même nature dimensionnelle, ce qui nous permet de structurer la surface du sol en cellules élémentaires parfaitement identifiables, par la même opération modulo sur la coordonnée du point intérieur gauche. Cette même cellule peut constituer la base d'une colonne parallélépipédique verticale qui prendra la même identité que la cellule sur laquelle elle est posée. C'est un dérivé classique du découpage en octree.

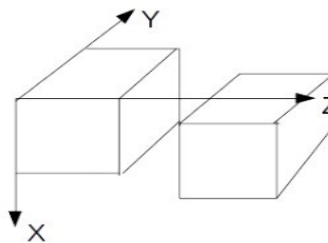


Figure 3 : Structuration spatiale, les seuls cubes peuplés de points

Ceci étant connu, dans une première lecture de notre fichier on classera les points par colonne d'appartenance, en construisant jusqu'à l'épuisement de notre classement des statistiques élémentaires sur la coordonnées Z (élévation) de la population de points par colonne (nombre de points, moyenne de l'élévation, écart type, valeurs minimales et maximales), ces statistiques pourraient être faites sur chaque coordonnée de la population de points de la colonne. Ces opérations sont conduites au vol lors de la lecture de notre fichier *.las. A l'issue de cette opération de lecture, nous disposons d'une première structuration spatiale de notre nuage de points, en fait des colonnes verticales posées sur le carroyage au sol avec des statistiques en élévation sur la population des points.

Les données du lidar mobile terrestre ou celles fournies par le simulateur, sont toujours installées sur un relief de terrain qui peut être plat ou accidenté. Or, pour la nécessité de la mesure, il nous faut installer chaque arbre de la zone dans un même référentiel de manière qu'ils aient tous leur souche à l'élévation (Z) zéro. Ceci nécessite une première transformation de notre nuage de points afin de le positionner dans ce que nous appellerons le relief zéro.

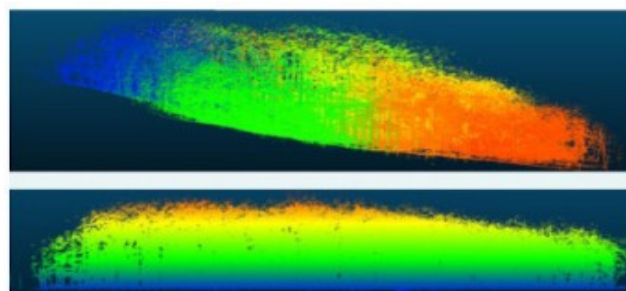


Figure 4 : Nuage de point avant et après mise au relief zéro

La structuration précédente nous donne une élévation minimale pour chaque cellule, **soit une évaluation du modèle numérique de terrain (M.N.T.)**. Aussi, une translation en Z de chaque point de la cellule concernée positionne tous les points dans le référentiel Zéro, en fait il s'agit d'opérer une soustraction du M.N.T du nuage de points initial. En outre, en ayant ainsi les coordonnées de tous les points dans le référentiel zéro rien de plus simple pour procéder à l'étape seconde et définitive de notre

structuration spatiale. Nous calculons l'identité du cube d'appartenance du point courant pour le placer dans son cube d'appartenance. Ainsi, en itérant l'opération sur chaque colonne de cellule, nous structurons tout l'espace de notre nuage de point dans un maillage cubique, posé sur un relief à l'élévation zéro. C'est à dire que la souche de chaque arbre, potentiellement présent, dans le nuage de points est maintenant à l'élévation zéro. Cette opération est donc conduite en deux étapes de classification. En outre, nous avons connaissance de la liste des cubes peuplés ce qui accélère d'autant l'accès à l'information utile.

Chp12 - Coupe tomographique du nuage de points

Nous donnons les mécanismes d'extraction des zones utiles à analyser, il s'agit en premier d'un plan horizontal de 3 cm d'épaisseur dont nous allons analyser le contenu. Le nuage de points étant posé sur un plan horizontal d'élévation (Z) zéro, on peut envisager les coupes tomographiques de ce nuage avec un plan horizontal de coupe couvrant la zone mesurée, de quelques centimètres (3 cm) d'épaisseur et cela à des hauteurs paramétrables. Une géométrie très simple nous permet de calculer les cubes peuplés du maillage intersecté et d'accéder ainsi très rapidement aux points à intégrer dans ce plan de coupe. Grossièrement, les arbres croissent en s'élevant perpendiculairement au sol qu'ils peuplent. Même si une forêt reste faiblement structurée en terme d'encombrement spatial, le mode de poussée d'arbre, en zone proche, est un invariant à exploiter, y compris en présence d'une rectitude perturbée. Une coupe horizontale, vue de dessus, fait apparaître des formes pseudo-circulaires de sections d'arbre à hauteur de la coupe tomographique. L'image ci-après, copie d'écran de CloudCompare, fait apparaître ces formes pseudo-circulaires de section d'arbre, il s'agit d'un fragment de vue de dessus d'un nuage de points d'une coupe tomographique. Par ailleurs, des éléments de bruit de mesure sont également présents, on devine la ligne droite d'une clôture, sur l'image qui suit (Fig. 5).



Figure 5 : Fraction de zone tomographique orthoprojetée

Notre objectif est de localiser dans ce nuage de point, ces formes pseudo circulaires et d'évaluer leurs dimensions et positions, donc le niveau de bruit ou d'information non pertinente doit être, sinon totalement éliminé, réduit à son minimum. Les

algorithmes adoptés sont présentés plus loin. Dès le début du processus de traitement, il est fondamental de prendre en compte l'existence de ce bruit dans la coupe tomographique. Ce que nous appelons bruit ici sont des échos issus d'objets forestiers autres que les sections d'arbre. Il peut s'agir de branches, de feuilles, de broussailles, voire d'artefacts de reconstruction du fichier *.las. La coupe tomographique, projetée sur le plan horizontal, peut-être traitée sous forme d'image (passage du 3D au 2D) par une orthoprojection sur le plan horizontal, mais nous nous en tiendrons, concernant cette dernière, à un usage visuel de contrôle. En effet, les données projetées, sont rassemblées du fait de notre structuration dans des quadTree ou octree à accès immédiat et offrent l'intérêt du traitement sous forme de listes plutôt que sous forme d'image d'une part, d'autre part, même si elles sont regroupées dans un quadTree ou octree nous conservons par ailleurs leur coordonnées Z. En effet dans une image l'orthoprojection du plusieurs points ayant les mêmes coordonnées [[X,Y] se confondent, mais avec des élévations différentes, nous préservons cette distinction. Nous préparons deux voies de traitements possibles une voie image (2D), une voie nuage de points (3D). Dans un premier temps, nous adoptons cette seconde voie.

Chp-13 Suppression du bruit des tomographies

L'information principale relativement stable est la présence du tronc d'arbre en élévation respectant des écarts de positionnement avec une certaine tolérance. Ceci se traduit par les mises en œuvre de comparaison de coupes tomographiques, à diverses élévations, du nuage de points mis au relief zéro. Dans le cas présent, notre intérêt se porte sur la seule détection, dans les données recueillies, des formes pseudo-circulaires représentatives des sections d'arbres. Les coupes tomographiques, parallèles au plan horizontal, d'une manière simplifiée et idéale sont perpendiculaires à la tige des arbres. Un élément de structuration des masses forestière est la poussée, a priori, verticale des tronc d'arbres. En conséquence, dans nos coupes tomographiques opérées à des coordonnées d'élévation proches, nous sommes susceptibles des les retrouver d'une élévation à une autre (distantes en Z de quelques décimètres). Nous allons utiliser cet invariant, afin d'identifier les éléments stables d'une coupe tomographique à une autre sur une échelle de 1 à 2 m. Par ailleurs à ce niveau nous ne manipulons pas le point élémentaire, l'élément manipulé est l'index de la cellule contenant des points, et nous surveillons uniquement la disparition des cellules (car non peuplée) au cours de nos itérations. En effet, les éléments stables sont en

fait des cellules contenant totalité ou fraction des échos représentatifs de la structure du tronc d'arbre. Tout le reste que ce soit en apparition ou en disparition est considéré comme du bruit de mesure et fait l'objet d'une non prise en compte ou d'une suppression de notre liste de donnée. Aussi, après quelques itérations nous nous retrouvons avec une liste nettoyée des bruits parasites de mesure. Ceci apparaît clairement sur les images de contrôle visualisée à chaque étape de l'itération. Partant d'un premier maillage de l'espace, à une dimension donnée (50 cm), il nous est encore possible d'améliorer cette suppression en procédant à un maillage plus fin (10 cm) du nuage de points issu de la coupe tomographique et c'est ce que nous avons constaté. En final, nous disposons d'une liste rassemblant essentiellement des amas de cellules de points représentatifs des seuls échos dus aux troncs d'arbres présents dans la zone de mesure. Il s'agit maintenant de localiser ces amas dans la liste et par là dans l'image de contrôle donc dans la zone mesurée. À cette localisation (position), nous associerons un premier estimatif du diamètre équivalent de ces formes pseudo-circulaires. La suppression de bruit est conduite par une technique de trois tampons de données, deux tampons alternatifs (A & B), prenant à tour de rôle les coupes N et N-1 qui sont progressivement émondées de toute présence de bruit par comparaison avec le tampon de coupe courante C. Au cours des itérations de coupe et comparaison, seuls les éléments présents à la fois dans les tampons N-1 et C sont préservés dans le tampon N qui deviendra N -1 à l'itération suivante. Selon la parité des itérations, le résultat final, c'est à dire la coupe tomographique nettoyée des éléments de bruit sera disponible dans le tampon A ou B. A ce stade nous travaillons toujours sur les seuls index ou clés d'identification des cellules contenant les points présumés d'arbre. Cette suppression de bruit est insatisfaisante à ce jour, car incomplète, voir la figure ci-après.

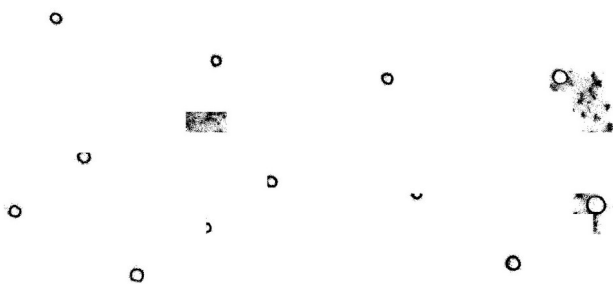


Figure 6 : Orthoprojection après 1ère suppression de bruit

Malgré la tentative de suppression du bruit, il demeure des amas non représentatifs de la présence

d'un arbre. Cependant dans une première passe, TOMOFORET dispose de tous ces points avec leurs coordonnées dans une carte organisée en mode quadTree, la construction de l'image orthoprojetée est immédiate. L'essentiel de ces amas est constitué de sections d'arbres bien construites, ou partiellement construites. Dans ce dernier cas, cette carence peut être liée aux occultations normales de mesure, ou à une défaillance dans le respect du protocole de relevé. Mais ces amas peuvent aussi être des bruits résiduels, ceci est identifiable visuellement sur l'image précédente. Pour un processus automatique, Il est nécessaire de qualifier ces amas litigieux (notamment les bruits résiduels) et selon le cas les traiter ou les supprimer. Quelques hypothèses de travail ont été évaluées, nous les citons. Un calcul minimax (X,Y), voire d'écart-type permet de présumer de l'encombrement de l'amas et de sa pseudo circularité, le nombre de points rassemblés dans un amas sont également un indicateur de la pertinence de l'amas. Il est également possible d'appliquer un filtre anneau circulaire afin de confirmer la validité de l'amas. Mais à ce jour, nous n'avons toujours pas résolu ce problème de manière satisfaisante en mode automatique. En conséquence, nous avons une image orthoprojetée des amas contenant toujours du bruit, TOMOFORET repasse la main à l'opérateur et c'est ce dernier qui, reprenant l'image générée, indique à TOMOFORET par simples clics sur cette image des informations de position des amas litigieux. Une fois cette collecte achevée il relance TOMOFORET, l'application TOMOFORET disposant de la liste des éléments litigieux élimine de manière certaine ces éléments qui seraient source d'erreurs de seconde espèce (bruit pris pour arbre), par contre des erreurs de première espèce (arbre non détecté) peuvent subsister. Ainsi une carte d'éléments non bruitée est proposée au traitement, l'image correspondante de la zone devenant l'orthoprojection suivante.

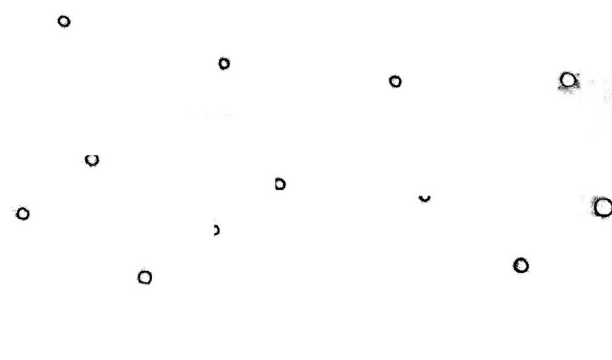


Figure 7 : Même zone avec retrait complet de bruit

Chp-14 Rassemblement des amas de points

À l'issue de la suppression de bruit, nous disposons de données, sous forme de liste de cellules (identifiées

par leur index), a priori rangées sans règle quelconque de structuration. Le rassemblement de ces cellules par voisinage géométrique sera l'élément distinctif de la présomption de présence d'une tige de tronc d'arbre. Pour cela, nous avons préparé des masques de voisinages de cellules de structure 3x3, 5x5 et 7x7, soit selon notre métrique cellulaire proposée [1m50x1m50], [2m50x2m50], [3m50x3m50]. En conséquence, chacun de ces masques contient une cellule centrale qui correspondra à la cellule dont on cherche les voisinages. Le traitement est fait en place mais nous en donnons une description avec des tampons de données, travaillant en bascule, il s'agit de rassembler dans des listes distinctes tous les tampons voisins contenant des points d'écho contribuant à une même section. Deux tampons de données A & B travailleront en bascule et un troisième C recevra les index de voisinage par amas au fur et à mesure de leur construction. Nous prenons la liste issue du traitement précédent qui deviendra le tampon A. Nous en prenons le premier index qui deviendra le pivot de notre recherche, nous créons notre premier amas dans la liste des amas et nous y plaçons cette première cellule pivot, nous construisons la liste des cellules voisines de ce pivot en le plaçant au centre du masque de voisinage retenu. En fait, le masque de voisinage contient la distance de la cellule centrale à la cellule de voisinage que nous souhaitons collecter, ceci est conditionné par la distance minimale que nous tolérons entre arbres. Une fois cette liste construite, nous itérons à travers le tampon A et nous contrôlons la présence ou non de l'index relevé dans A dans la liste des cellules voisines préalablement construite. Si présent, il est mis dans l'amas en construction dans C. Si absent, il est placé dans le tampon B pour classement ultérieur. À l'épuisement du parcours du tampon A le premier amas est construit, le tampon A est effacé. On permute les rôles de A et B et on reprend le cycle pour l'amas suivant. La construction des amas s'achève dès que les tampons A & B sont vides. Un amas ayant collecté tous ses voisins, en absence de bruit, est présumé être représentatif de la position d'un arbre. L'ensemble des amas collectés est stocké dans une carte. Cette carte est passée à l'étape suivante du pipeline de calcul qui assure l'évaluation du barycentre et du diamètre équivalent de chaque amas construit.

Chp-15- Barycentres et diamètres équivalents

Rappelons que la qualité de relevé sur zone impacte fortement les niveaux de densité d'écho sur les arbres, car on est confronté sur le terrain à des phénomènes d'occultation et de distance qui peuvent altérer la qualité des données relevées. En effet, on peut se

retrouver ainsi avec des fragments d'échos de section d'arbre (visibles sur les orthoprojections) ce qui affaiblit fortement la fiabilité du calcul de diamètre équivalent, la position restant faiblement affectée. Par contre le critère de décision quant à une présence effective d'arbre est renforcé suite à l'intervention d'un opérateur humain dans la phase précédente de suppression de bruit, l'opérateur humain sait reconnaître un amas mal formé de section d'arbre. Les amas de cellules étant reconstituées, chacune contient des points qui sont présumés appartenir à une section d'arbre donc d'en représenter la position au sol. Les itérations sur chaque cellules des amas rassemblent les points et permettent les calculs de barycentre et de position. Cependant, la structure de chaque amas et sa qualité doivent être évaluées avant de conclure sur une présence d'arbre. En effet nous sommes dans une démarche de présomption et cette dernière doit être renforcée afin de réduire notre taux d'erreur ou de fausses alarmes, seconde espèce dans le cas présent, l'erreur de première espèce est totalement liée à la problématique de relevé et ne peut être corrigée. L'application, reprenant son cours, assure le nettoyage de la carte contenant les collections d'amas issus du rassemblement du chp14 et relance les calculs des positions et diamètres équivalents. Nous terminons la qualification de l'amas en évaluant un rayon équivalent par la méthode des moindres carrés. Le rayon équivalent est bien sûr faux sur les amas de section mal formé Notre premier intérêt est la localisation précise, l'estimation du diamètre donne un indicateur pour l'extraction de la volumétrie de points autour de l'arbre depuis le nuage de points au relief zéro. Nous disposons des positions et diamètres des sections d'arbre retenues. Nous pouvons procéder à l'extraction individuelle des nuages de points d'arbre du nuage de points global. Pour des objectifs de contrôle notamment sur site nous avons la possibilité de générer une image labellisée, par le N° d'enregistrement de l'arbre en base de données et sa position dans le référentiel sol local [N°_X_Y] comme ci-dessous, les coordonnées locales étant exprimées en cm. Le carré centré valide la fiabilité du calcul de position.

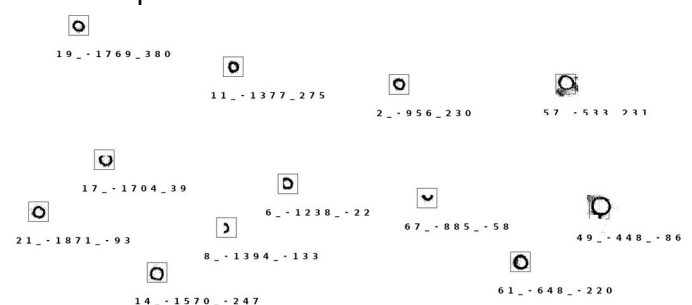


Figure 8 : Image débruitée collection de sections labellisées (fraction image)

Cette image est particulièrement utile dans les phases de contrôle lors des retours sur site.

Chp16 - Extraction des arbres

Le calcul du barycentre, coordonnées [X,Y] de chaque amas circulaire nous donne la position présumée de chaque arbre dans le nuage de point. Par ailleurs, sachant que la première coupe tomographique s'effectue à hauteur de poitrine au standard de 1.30m, préalablement à la suppression de bruit, cette coupe donne la référence de hauteur et de diamètre à partir desquels commencer les évaluations de volume. Ayant connaissance du rayon équivalent à cette hauteur, ceci nous permet d'extraire les nuages de points propres à chaque arbre depuis le nuage global mis au relief zéro. Cette première extraction est circonscrite à une colonne verticale parallélépipédique à base carrée, centrée sur le barycentre. Le côté de la base carrée possède une valeur représentant 5 fois le diamètre estimé, ceci permet de récupérer une fraction essentielle du nuage de points de la structure de l'arbre.

A défaut de données initiales, caractérisant les structures de poussée de l'arbre, nous avons retenu trois hypothèses de travail quantifiables qui seront ajustées ultérieurement après les mesures de calibration présentées au chapitre 17. Ces hypothèses conditionnent nos constructions algorithmiques actuelles, elles sont donc paramétrables. **La première hypothèse** est que nous considérons que la zone de tronc allant de 1 m à 3 m d'élévation présente une bonne régularité de relevé, ce qui veut dire que les éléments de la majorité des nuages de section sont bien formés et bien fermés, ceci permet une évaluation représentative du diamètre moyen, donc peu de branches dans cette fraction de tronc a priori.

La seconde hypothèse se réfère à la formation du tronc en fonction de l'âge. Ainsi, même si le tronc lors de sa croissance connaît des anomalies de régularité de forme nous considérons que la décroissance métrique moyenne du diamètre en élévation est inférieure en valeur absolue à 0.3. **La troisième hypothèse** se rapporte à la rectitude de l'arbre, c'est à dire sa propension à croître verticalement qui est également altérée, mais nous retenons que le sommet fin bout (7cm de diamètre tel que retenu dans la profession) ne sorte pas d'un carré centré sur la souche dont les côtés sont 5 fois le diamètre de base.

Cette heuristique nous permet de construire nos algorithmes qui feront l'objet de correction à l'issue de nos travaux de calibration, présentés dans le chapitre 17, qui donneront les domaines de variation de ces trois paramètres.

On peut réduire la base carrée du parallélépipède vertical d'extraction mais selon l'altération de la rectitude de l'arbre le risque de sortie de sa partie supérieure de ce parallélépipède existe. L'élagage des branches n'étant pas suffisante en montée de tronc, leur présence dans le nuage de point altère les calculs dimensionnels. il est nécessaire d'avoir un calcul diamétral en deux étapes. L'évaluation inférieure des troncs peut s'appuyer à juste titre sur l'absence de branches et l'élimination de bruit tel que présenté au chapitre 13. Ceci nous permet de lancer les premiers calculs de diamètres et barycentres dans la partie inférieure du tronc. Cependant une normalisation de la section pseudo-circulaire s'impose. En effet, dans celle-ci on peut se trouver avec une couronne de points donc la densité n'est pas homogène. En conséquence, les zones à forte densité pondère de manière erronée le calcul du barycentre ce qui impacte le calcul du diamètre équivalent et par la même du volume. Les algorithmes d'exploitation de la section brute mis en œuvre initialement, comme les algorithmes de HOUGH circulaire ou de RANSAC sont très sensibles à cette absence d'homogénéité de densité. Il nous apparaît nécessaire d'assurer cette reconstruction d'homogénéité sachant que le problème peut s'amplifier par une absence totale de points dans certaines zones de la section. Outre les deux algorithmes précédents nous avons conduit des évaluations que nous avons dénommées fermeture convexe comme indiqué dans la figure ci-dessous.

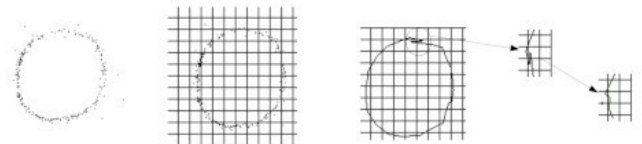


Figure 9 : Exemple de clôture convexe

Un filtre de carroyage est posé sur la section circulaire (Fig. 9), chaque cellule peut contenir plusieurs points d'écho, dans chaque cellule nous réduisons ce nombre au barycentre seul des éléments de cette cellule. De ce fait une cellule avec 20 échos se réduit à un seul point au même titre que la cellule qui n'aurait qu'un seul point. Ceci à un effet de normalisation qui corrige les défauts de relevé et nous permet de calculer un barycentre de section proche de la réalité en éliminant le poids de densité de points d'écho mal réparti. Le problème de l'absence de points dans certaine cellules exige un travail de complétion que nous étudions actuellement. Les évaluations précises des barycentres de section et de leur diamètre équivalent nous permettent de conduire des traques de barycentres en élévation associées à des élagages complémentaires sur la base d'un diamètre prédictif issu du diamètre courant associé à une incertitude liée à la décroissance métrique

moyenne. Les images qui suivent illustrent les étapes de la construction et des évaluations attributaires, elles sont générées uniquement dans les phases de test et d'évaluation, elles ne respectent pas nécessairement les échelles, pour des raisons de mise en page.

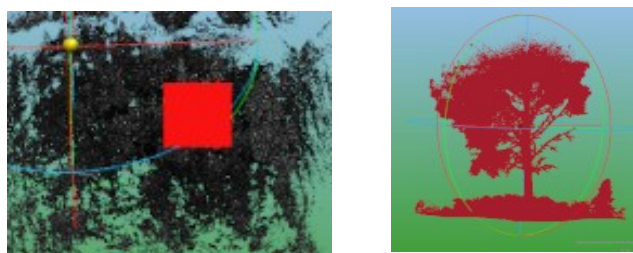


Figure 10 : Zone d'extraction et arbre extrait d'un nuage de points

La figure 10 présente une zone d'extraction depuis la vue de dessus d'un fragment de nuage de point. et le nuage de points de l'arbre extrait. La zone d'extraction est localisée par le calcul de la position et le diamètre de l'arbre à 1.30 m.

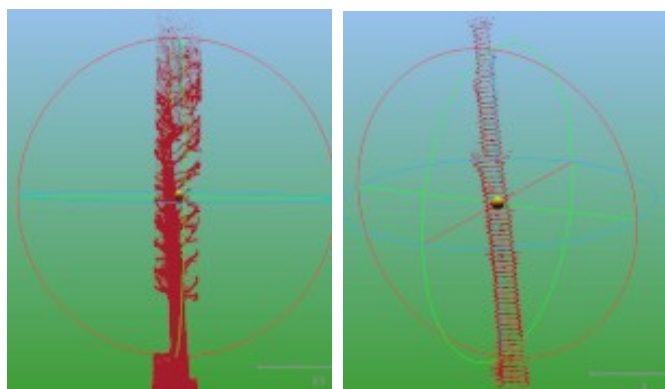


Figure 11 : Les 2 passes de nettoyage du tronc

La figure 11 présente le même arbre ayant subi deux élagages, le premier par un parallélépipède vertical et le second par l'algorithme de traque du barycentre en élévation. Des anomalies persistent (constat visuel) dans la montée pour les raisons explicitées précédemment, ces anomalies impactent les précisions de calcul, d'où l'approfondissement nécessaire. Des travaux inspirants ont été conduits sur le sujet (13), dans le domaine de la mécanique.

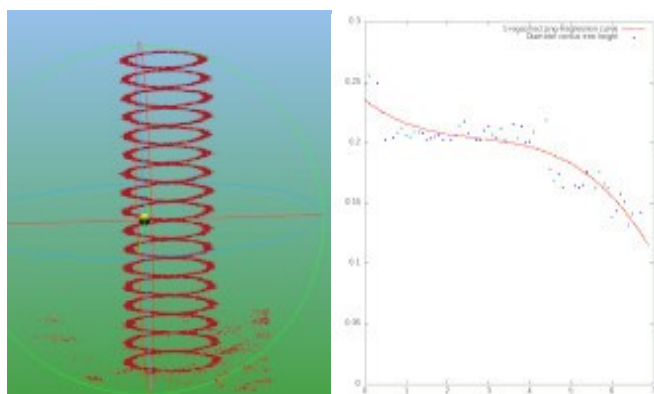


Figure 12 : Zone hypothèse de référence et régression hauteur diamètre

La figure 12 présente à gauche une évaluation des coupes de sections sur 1m60 partant de la souche, a priori la structure de démarrage est peu altérée par le bruit. Le graphique de droite donne le nuage de points

des diamètres calculés par pas de 10 cm en élévation avec des fluctuations assez régulières sur les 4 premiers mètres et ensuite une rupture assez forte liée à la dissymétrie des échos de section que nous avons à corriger, comme indiqué précédemment. L'interpolation de degré 3 est perturbée au démarrage.

Chp17 - Contrôle et calibration

Les contrôles directs non destructifs, arbres sur pied, restent difficiles en forêt et sont extrêmement chronophages. Nous avons **trois** approches : **1)** relevés des diamètres orthogonaux au compas forestier à une hauteur de 1.30 m sur chaque arbre d'une zone déjà relevée au lidar, ce relevé doit respecter strictement le séquençage de position des arbres, **2)** arbre par arbre chacun étant relevé au lidar nous adoptons une méthode indirecte pour mesurer les diamètres orthogonaux jusqu'à une hauteur de 5 m, par pas d'élévation de 10cm, une mire verticale de 5 m est apposée à l'arbre et une seconde mire horizontale au pied de l'arbre, un cliché photographique est pris et un traitement d'image sur la silhouette calibrée de l'arbre nous donne 100 valeurs de diamètres, **3)** enfin un dernier contrôle destructif celui-là, une zone boisée destinée à la coupe sera relevée préalablement au lidar et chaque arbre étant identifié, les arbres seront abattus il sera ensuite procédé à la mesure au sol de chacun de ceux-ci, diamètres orthogonaux sur l'ensemble des troncs abattus et identifiés.

Ces travaux sont en cours à ce jour et doivent être achevés en avril 2025. Ils doivent nous permettre d'ajuster les paramètres évoqués au chapitre 16. Il est clair que pour être exhaustives, ces mesures doivent être conduites sur diverses formes d'arbre. Nous commencerons bien sûr par les essences les plus communes en exploitation forestière. Ceci est présenté de manière plus détaillé au chapitre 22.

Chp18 – Présentation des résultats

La présentation des résultats est une étape importante. Toutefois dans l'immédiat nous avons fait le choix d'une certaine sobriété pour cette mise à disposition, à savoir :

- le fichier *.csv tel que présenté au chapitre 4 et donnant ligne par ligne les attributs d'arbre,
- ces mêmes données avec des enrichissements complémentaires spécifiques aux tests de développement sont versées dans une base de données SQLite,
- un graphique de peuplement de la zone (chaque arbre étant présenté par un point) illustre la zone d'intérêt à une échelle réduite

dans le périmètre d'extraction, ce graphique comporte également des informations complémentaires : surface terrière, nombre d'arbres, localisation géographique, dates de relevé, propriétaire, données cadastrale, etc ...

Chp19 – Intégration finale

Les algorithmes de traitement des nuages de points au fur et à mesure de leur codage ont fait l'objet de création de classes. Ces dernières ont permis la création de bibliothèques indépendantes qui peuvent être exploitées soit en mode statique, soit en mode partagé. Au fur et à mesure et à mesure de leur développement elles sont déposées sur GITHUB pour assurer la gestion de version.

L'application finale TOMOFORET exploite ces bibliothèques associées aux bibliothèques listées dans le chapitre 7. L'intégration de l'ensemble du développement est mis en œuvre à travers une I.H.M (Interface homme machine) dont le développement est assuré sous Qt6.

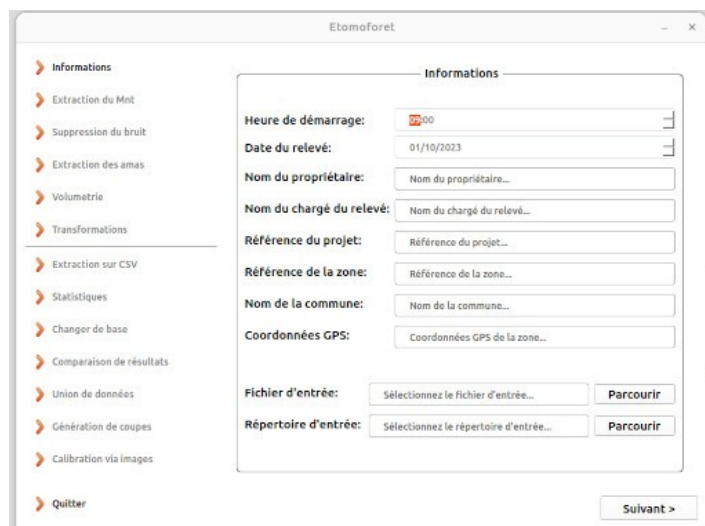


Figure 13 : Page d'accueil de l'application eTomoforet

Bien que développées avec des logiciels libres, les bibliothèques obtenues restent des bibliothèques propriétés de A.E.F. J. Louvet, sous licences L.G.P.L mais ne font l'objet d'aucune distribution vu que TOMOFORET reste un service industriel à disposition de tout fournisseur de nuage de points (certifié A.E.F. J. Louvet) et ce service est géré uniquement par A.E.F. J. Louvet.

Chp20 Induction statistique et inventaire

L'ambition initiale était d'effectuer un inventaire pied à pied exhaustif par quantum de zones forestières, trois types de données sont fournis pour chaque arbre : 1) sa position géographique, 2) une collection de diamètres de la souche au sommet fin-bout, 3) les volumes de bois disponibles tant pour le bois d'œuvre

que pour le bois d'industrie. À ces mesures quantitatives devaient être ajoutées des éléments qualitatifs relatifs aux stress sanitaires de la zone relevées. Nous y sommes pour certains aspects, le faible rendement surfacique de mesures fait que nous apportons peut-être une taille de placette plus grande en inventaire forestier mais nous n'échappons pas à la nécessité de l'induction statistique pour de plus grande surface. Par contre en matière d'exploitation forestière ou d'évaluation patrimoniale de petites zones nous apportons une réponse, mais compte tenu de la technologie le quantum de surface est limité à 5000 m² par relevé.

Chp21 – La gestion du projet de transfert

Pour l'ensemble du projet TOMOFORET de recherche et développement, il s'agit d'assurer le transfert d'une preuve de concept fonctionnelle d'une technologie de mesure, disposant d'éléments opérationnels non intégré au TRL 6 pour les porter au TRL 9 pour aboutir à un produit industriel. Les codes prototypes sont remis au cas par cas avec des notes justificatives, aux ingénieurs de développement de A.E.F J. Louvet (2 personnes) en charge de l'amélioration des algorithmes, des codes et de l'intégration industrielle. Cette remise est effectuée par le pilote externe du projet (1 personne). Des accompagnements ponctuels de mesures en forêts sont assurés par des experts forestiers (2 personnes). L'activité est un mixage de présentiel et de télétravail. Un courriel quotidien de chaque participant (1 à 2 lignes) synthétise le travail du jour, une messagerie instantanée est utilisée en permanence. Une réunion hebdomadaire très brève donne lieu à un compte rendu hebdomadaire intégrant pour chacun son bilan de la semaine et le prévisionnel de la semaine à venir. Un outil d'imputation horaire est en place, il est pris en compte par le seul pilote du projet externe à l'entreprise A.E.F J. Louvet.

Chp22 – Besoin de tests, contrôle, calibration

Toutes mesures s'adossent à un étalon donc une même évaluation selon plusieurs voies. Dans notre cas, le retour terrain est obligatoire après le dépouillement de nos relevés LIDAR pour des relevés manuels de contrôle. Notre premier terrain d'expérimentation a été la pépinière du conseil départemental des Pyrénées Orientales peuplée essentiellement d'essence de pins.



Figure 14 : la pépinière des Pyrénées Orientales (Extraction Géoportail)

Notre zone d'intérêt est la zone périmétrée en blanc ci-dessus, environ 7000 m² peuplée de 400 tiges environ, elle est centrée sur le point de latitude 42.673477° et de longitude 2.719131°. Le peuplement est relativement bien aligné ce qui facilite la synchronisation spatiale de nos relevés manuels avec les sorties automatiques de TOMOFORET. Bien sûr des relevés ont été conduits ailleurs, mais nous avons ciblé cette zone pour nos premières validations. Divers relevés y ont été conduits :

- relevés manuels à 1 m30 de deux diamètres orthogonaux et de la circonférence sur chaque arbre,
- relevé par lidar Zeb-Horizon FARO ligne par ligne, une ligne sur deux, et par zone réduite de 600 m²,
- relevé unique de comparaison par lidar ORBIS FARO, à la fois périmétrique et par boucles internes
- deux relevés aériens par parcours orthogonaux basés sur le lidar Zenmuse L2 (5 échos) de DJI, à 6 m au-dessus de la canopée à une vitesse de déplacement de 1 m/s.

Ceci donne lieu à des dépouillements qui sont toujours en cours. Certains résultats sont présentés au chapitre suivant.

Les chapitres 15 et 16 posent certaines hypothèses qui nous ont conduit à compléter nos mesures de manière plus précise, à savoir mieux identifier le mode de croissance d'un arbre sur ces 5 premiers mètres d'élévation.

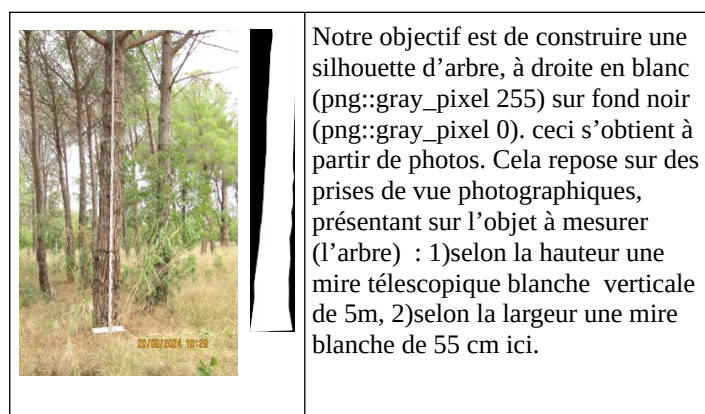


Figure 15 : Prise de vue pour calibrage et silhouette d'arbre

Le cadrage de la prise de vue, permet de voir l'entièreté de la hauteur. La photo obtenue est au format *.jpg. Les mires fournissent les résolutions verticales et horizontales en cm/px dont on déduit les dimensions recherchées. En phase de calibration, il est recommandé pour chaque arbre deux prises de vue orthogonales. Il est utile d'avoir une faible profondeur de champ, le focus devant être porté sur l'arbre pour

un bon contraste avec l'arrière-plan. Ceci fait l'objet d'un traitement d'image qui nous donne :

- une collection de diamètres par pas de 10 cm en élévation soit 100 diamètres (2x50 orthogonaux) par arbre,
- la décroissance métrique moyenne du diamètre en élévation,
- des gradients de rectitude $\frac{\partial x}{\partial z}$ et $\frac{\partial y}{\partial z}$.

Il s'agit de paramètres permettant d'ajuster notre traque de barycentre en élévation lors de sa poursuite dans la phase de calcul des diamètres en élévation permettant de déboucher sur les calculs de volumes comme indiqué dans le chapitre 16.

Chp23 – Quelques validations

L'avancement du projet, en terme d'algorithmique, est contraint par notre perspective industrielle de mettre en place à son issue un outil de production totalement opérationnel. Ceci nécessite d'assurer parallèlement, de manière synchrone, la bonne validation fonctionnelle de l'outil de traitement TOMOFORET en cours de développement. Il est le réceptacle de tous nos travaux de recherche. À l'issue de nos deux premières années d'activités une version complète, de l'outil TOMOFORET, a été intégrée. Les fonctions de calcul de position d'arbre comme l'évaluation de leur diamètre donnent des résultats satisfaisants, la volumétrie est présente et donne des estimations souvent correctes mais nécessitant encore des ajustements algorithmiques. Sachant que le fonctionnement complet de la chaîne de traitement TOMOFORET est récent nous n'avions pas jusque là la capacité d'enchaîner rapidement des dépouillements de relevés facilitant l'identification précises de dysfonctionnements afin d'y apporter des mesures correctives dans nos algorithmes et nos codes.

Il s'agit d'avoir une corrélation aussi forte que possible entre les éléments d'estimation fournis par le calcul effectué sur les données issues des relevés LIDAR et les données de relevés manuels. Par ailleurs des mesures sur une même zone conduites à des périodes distinctes voire avec des instruments différents doivent donner des résultats similaires dont nous évaluons les écarts. Enfin pour deux mesures distinctes sur une même zone il est nécessaire de travailler exactement dans le même référentiel, en conséquence chaque fois nous avons à faire le changement de base qui s'impose. Que l'écart en distance soit de quelques centimètres ou de dizaines de mètres et l'écart d'orientation soit de quelques degrés ou de plusieurs dizaines de degrés en

orientation. En tout état de cause, on ne doit pas s'écarter de notre fenêtre de précision. Les changements de base s'avèrent précis et reproduisent les mêmes résultats, d'un relevé à l'autre.

Le tableau ci-dessous donne des comparaisons de mesures de distance en mètresv entre arbres, elles sont représentatives des précisions dans le référentiel local.

Mesures	Calculs	Taux d'erreur en %
4,40	4,41	0,23
17,00	17,02	0,12
12,40	12,35	0,40
9,20	9,22	0,22
5,65	5,60	0,88
20,10	19,99	0,55
3,96	3,92	1,01
13,46	13,51	0,37
11,02	11,06	0,36
7,36	7,27	1,22
18,37	18,26	0,60
4,88	5,01	2,66
26,50	26,41	0,34
10,94	10,98	0,37
23,00	22,92	0,35
20,26	20,16	0,49
27,40	27,40	0,00
13,72	13,64	0,58
Moyenne		0,60
Ecart -type		0,60

Tableau 1 : Distances mesurées versus distances calculées
 En matière de distance nous avons également effectué une comparaison entre un calcul issu des données Zeb-Horizon et un calcul issu des données ORBIS.

Distance ORBIS : 128,50 m Distance Zeb-Horizon : 128,10 écart : 0.4 soit 4.°° , Distance ORBIS : 51,55 m Distance Zeb-Horizon : 50,77 écart : 0.22 soit 4.°° .

Nous soulignons l'importance d'une **métrique de validation** de nos mesures, le **coefficient de détermination R** . Il qualifie la qualité de notre modèle , (**Proche de 1 excellent, proche de 0 médiocre**), pour un même attribut X est calculé, Y mesuré, soit :

$$R = \frac{cov(X, Y)}{\sigma_x * \sigma_y}$$

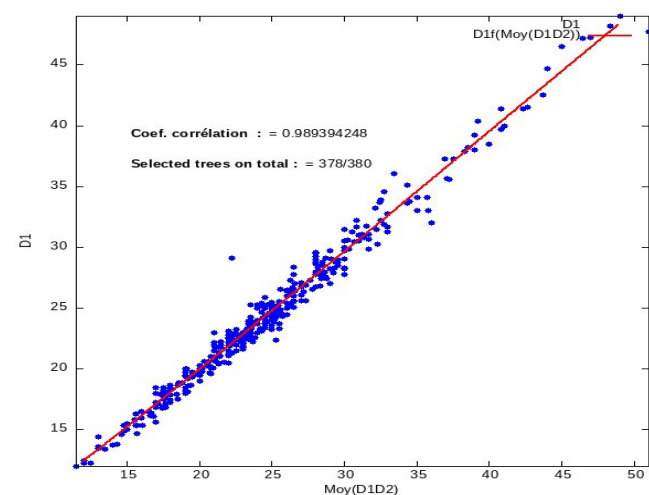


Figure 16 : Ecart mesure D1 et moyenne D1/D2

En mesure forestière il est commun de mesurer à 1m30 les deux diamètres orthonormés D1, D2 et la circonférence dont on déduit le diamètre DCirc. Le graphique donne la répartition et la courbe de corrélation entre la valeur de diamètre D1 et la moyenne D1,D2, soit $D1 = f(\text{Moy}(D1,D2))$

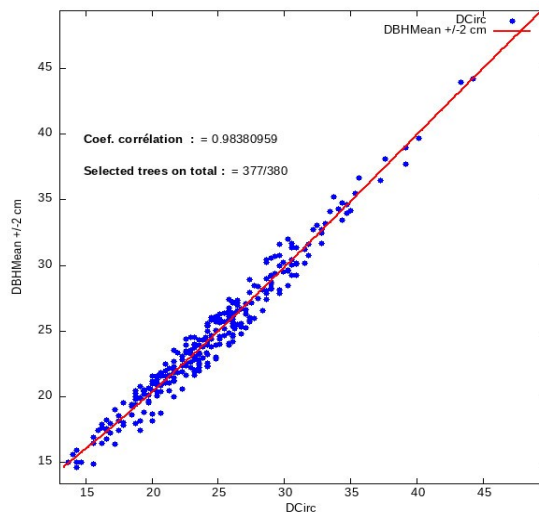


Figure 17 : Ecart calculé DBH et Dcirc issu de la mesure sur site

Les graphiques ci devant, s'intéressent :

- figure 16, aux seuls relevés manuels réalisés sur un peuplement de pin de faible diamètre essentiellement entre 15 et 35 cm,
- figure 17 à la répartition et à la courbe de corrélation entre la valeur de diamètre DBH calculée lors de l'évaluation des attributs d'amas de section et le relevé manuel de diamètre issu de la circonférence et respectant une tolérance de ± 2 cm soit $DBH = f(Dcirc)$.

Le graphique qui suit donne la répartition et la courbe de corrélation entre la valeur de diamètre DBH issue de la régression et le relevé manuel de diamètre issu de la circonférence et respectant une tolérance de ± 2 cm soit $DBH = f(Dcirc)$.

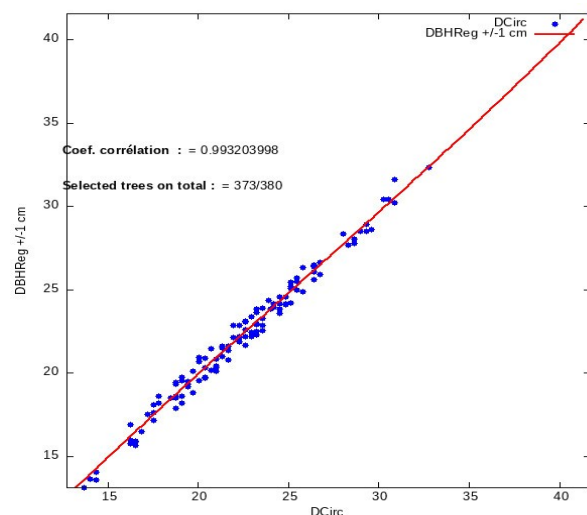


Figure 18 : Ecart valeur régression et diamètre circonférence mesurée
 Il s'agit d'une zone de peuplement équiennne, les graphiques ci-dessous (fig.19 & fig.20) donnent un

visuel de la répartition des diamètres des arbres de la population.

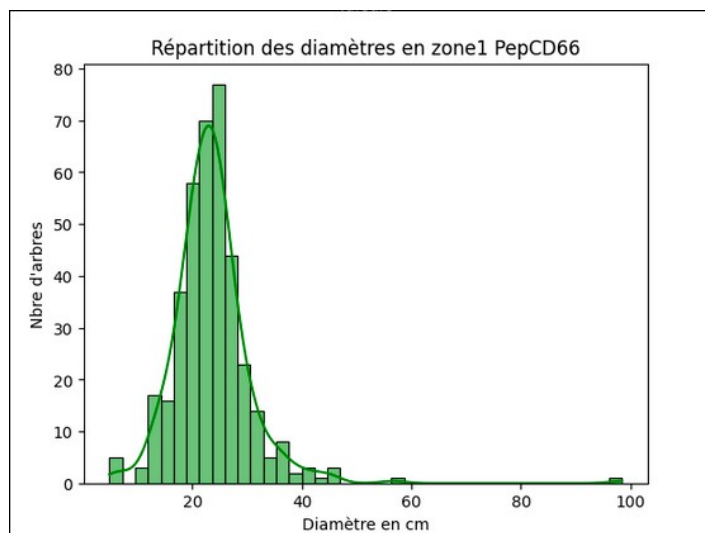


Figure 19 : Histogramme de peuplement de la zone

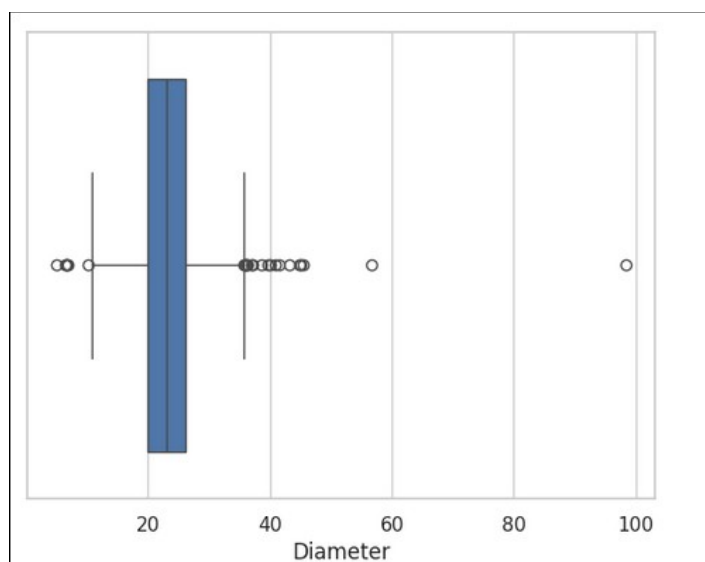


Figure 20 : Boîte à moustache donnant les quantiles et valeurs aberrantes

Chp24 - Bilan des informations issues des relevés

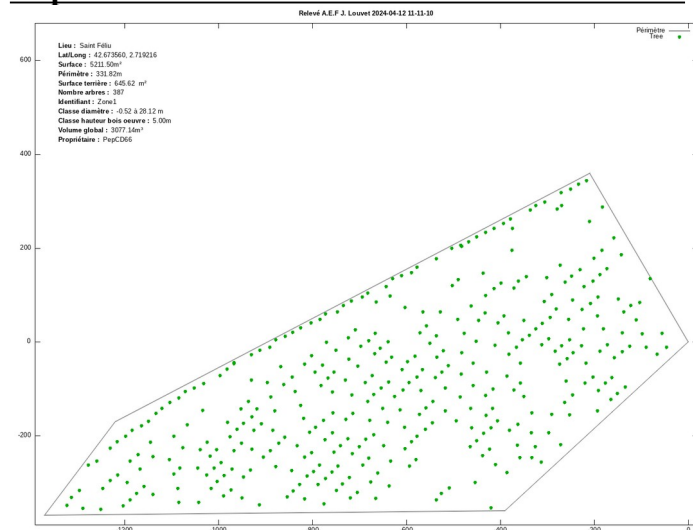


Figure 21 : Détournement cadastral et plan d'implantation de la zone extraite

- la figure ci-dessus, orientée nord/sud donne l'implantation physique relative dans le référentiel sol de mesure du peuplement avec détournement géométrique de la zone, des informations complémentaires identifient le lieu, donnent son périmètre et sa surface, le nombre d'arbre, la surface terrière et le volume de bois disponible sur la zone
- un fichier *.csv, associé à une base de données SQLite donnent pour chaque arbre, sa position, son diamètre à 1.30m, son volume de bois disponible, l'écart de rectitude au sommet et d'autres informations propres au développement et aux tests sont également présentes.
- Une image labellisée (à l'échelle 1pixel =1cm) (voir fig. 8) indique pour chaque arbre sa position relative sur la zone, ainsi que son identifiant d'enregistrement en base de données,
- En option il est possible de disposer :
 - du modèle numérique de terrain de la zone en mode nuage ou raster,
 - des différents nuages de points :
 - brut à la sortie de mesure,
 - circonscrit à la zone d'extraction,
 - zone d'intérêt au relief zéro,
 - nuage de points de chaque arbre individuel.

Chp25 – Caractéristiques des lidars utilisés



Figure 22 : Lidars mobiles terrestres mis en œuvre (Crédit Faro, Cybernetech)

Zeb Horizon : 300 Kpoints/s, portée 100m, Champ de vision 360° x 270°, possibilité de caméra non utilisée.

Orbis : 600 Kpoints/s, portée 120m, Champ de vision 360° x 270°, possibilité de caméra non utilisée.



Figure 23 : lidar Zenmuse L2 porté par drone (Crédit DJI)

Zenmuse L2 portée 450 m, 1 200 000 pts/s pour 5 échos, 240 000 pts/s pour 1 écho.

Chp26 Conclusions sur le réalisé

À l'issue de ces deux années de R&D Nous disposons d'un chaîne complète de traitement automatique que nous avons développée intégrée et construite. De facture industrielle et professionnelle, elle nous permet d'extraire pour chaque relevé les données et informations précisées au chapitre 24. À cette fin nous y avons intégré l'ensemble des algorithmes mis au point, par nos travaux, au cours des deux années. Seul le simulateur est resté à l'état de prototype.

Concernant les transferts, partant d'une feuille blanche pour la société A.E.F J. Louvet, ce projet de transfert de technologie et de compétences à l'issue de la deuxième année de son parcours sur trois ans programmés peut se satisfaire de certains points : 1) deux ingénieurs de haut niveau sont formés et rompus aux travaux de mesures en forêt, d'algorithmiques de traitement de données forestières, de génie logiciel et de mise en place des infrastructures de travail, 2) l'environnement technologique est totalement identifié, fonctionnel et opérationnel, 3) les procédures de travail qu'il s'agisse de mesures de développement ou de traitement sont documentées, tout au plus restent-elles à être intégrées aux règles documentaires de A.E.F. J. Louvet, 3) une version industrielle de la chaîne de traitement est développée elle est totalement spécifiée dans sa version complète de recherche et développement, 4) chaque algorithme spécifique mis en œuvre à ce jour bénéficie d'une note justificative. Il reste à conduire une appropriation complète notamment par le déploiement de la version TOMOFORET de production et l'inscription de cette nouvelle activité dans une démarche de certification ISO par A.E.F. J. Louvet.

Cependant des insuffisances scientifiques et techniques subsistent nous donnons ci-après les étapes de travaux pour y pallier. Ce sera l'objet de la troisième année du projet.

Une limite immédiate est l'erreur de 1ère espèce, c'est à dire la non prise en compte d'un arbre existant, est présente à ce jour. Par contre la reprise en cours de traitement des images d'implantation élimine totalement (sauf erreur de l'opérateur) le risque d'erreur de seconde espèce c'est à dire l'assimilation d'une zone de bruit à un arbre.

Concernant l'activité de mesure tomographique et la R&D associée, l'évaluation de la localisation comme le diamètre à 1.30 m est satisfaisante, par contre des marges de progrès restent encore à combler concernant la volumétrie, notamment une pleine validation à différentes élévations. Les divers tests conduits à ce jour sur l'outil TOMOFORET sont largement insuffisants, de nombreux dépouillements restent en suspens ils seront traités en décembre 2024 et janvier 2025, d'autant plus que la version complète de l'outil TOMOFORET vient à peine de s'achever. En 2025, la base de travail (nous la donnons plus loin), en place à ce jour va permettre de finaliser la calibration et le test des outils développés. Les procédures de relevés sont à améliorer, afin d'accroître l'homogénéité et la densité de points sur les troncs d'arbre. En dépit d'une solution semi automatique, l'automatisation de la réduction de bruit reste posée. La traque des barycentres en élévation sera reprise avec le bénéfice des calibrations, pour cela les mesures de calibration devraient apporter un enrichissement du paramétrage concernant la décroissance métrique moyenne, l'altération de la rectitude par une quantification plus précise de ces paramètres, ce qui permettra que l'algorithme de traque du barycentre en élévation soit retravaillé et approfondi. Notre approche est fortement géométrique et déterministe, elle est dénommée « Approche géométrique à faible bruit ». On ne peut pas écarter l'apport possible de l'apprentissage profond, une approche YOLO a été abordée et des cas d'étude sont planifiés pour 2025 et 2026.

Chp27 Les perspectives des années à venir

Le projet initial était planifié sur 3 ans, deux années ont été consommées. Nos priorités pour les deux années qui viennent sont:

- l'amélioration de la poursuite barycentrique en élévation afin d'améliorer l'évaluation de volume bois,
- la réduction du risque d'erreur de 1ère espèce qui reste un défi important, mais 3 pistes s'offrent à nous :
 - l'exploitation de la couverture aérienne qui, quoique ne détectant pas tous les

arbres, pourrait en détecter certains qui furent occultés au sol,

- l'amélioration des règles de relevés sur zone est une vraie difficulté, car cela relève plus de l'expertise propre de l'arpenteur, quoique des outils temps réel de suivi de parcours puissent être envisagés,
- un arbre peut être illuminé à différentes hauteurs, de manière peu régulière, des approches de correction de l'homogénéité de la densité de points ont été conduites par l'Institut suisse de la forêt (14), pour notre part nous aborderons en outre une possibilité de coupes tomographiques multiples à différentes élévations, on l'associe entre autres à une exploration de l'apprentissage profond,
- les travaux de calibration s'étendront :
 - ceux présentés au chap 22 sont toujours en cours et se poursuivront,
 - en mars 2025 il est planifié un relevé destructif, une zone sur pied (a priori des pins Douglas ou hêtre) sera relevée au lidar, chaque arbre étant identifié, il sera ensuite procédé à la mesure au sol dans son entièreté de ce groupe d'arbres,
 - en mai 2025 une zone de 16 ha (pins Douglas) sur pied sera relevée par fragment de 5000 m², soit 32 relevés individuels, nous quantifierons statistiquement les performances d'évaluation de la zone globale de 16 ha à partir de chaque échantillon de 5000 m², selon les performances nous envisagerons de réduire la taille de l'échantillon, ceci nous renverrait vers des techniques d'évaluation globale de la ressource bois sur plusieurs dizaines d'hectare à partir de placettes de 0.5 ha, voire moins, à 1 ha,
- l'évaluation de l'apport des relevés aériens au moyen de Lidar notamment :
 - pour la réduction des erreurs de première espèce,
 - pour l'évaluation de la cime de chaque arbre dans la zone liée au carré géométrique d'incertitude dû à l'altération de la rectitude de l'arbre,
- la mise en place d'une capacité de stockage sécurisée et de grand volume des données, capable d'assurer un flux de données à très haut débit pour les échanges,
- enfin un dernier point lié aux volumes de calculs qui pourraient advenir dans le futur, concerne la parallélisation de nos traitements

qu'ils s'agissent de nos stations de travail, ou de machines parallèles déportées de calcul à hautes performances, ceci a été abordé de manière très rapide dans le cadre du développement de notre simulateur, c'est un problème purement technologique dont la mise en œuvre est conditionnée par le volume du marché.

Bibliographie

1. Carrié E, Fournier RA, Jean-François Côté, Van-Tho Nguyen, Abdelmounaime Safia. Utilisations de la technologie LiDAR terrestre pour la gestion des forêts et l'écologie forestière. 2019 [cité 25 nov 2024]; Disponible sur: <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.12818.40642>
2. Rondeux J. La mesure des arbres et des peuplements forestiers. Gembloux: Presses agronomiques de Gembloux; 1999.
3. Burkhart HE, Avery TE, Bullock BP. Forest measurements. Sixth edition. Long Grove, Illinois: Waveland Press, Inc.; 2019.
4. Chaudé Pierre. Tarif de cubage à décroissance variable pour les arbres sur pied. Jean Chaudé. Jean Chaudé; 1999. 400 p.
6. Rapport technique lidar.
7. Bariou Marcel. Mesure Lidar et Tomographie forestière [Internet]. Brasnah sarl; 2019. Disponible sur: <https://urls.fr/KrQsm3>
8. Carson WW, Andersen HE, Reutebuch SE, McGaughey RJ. LIDAR Applications in Forestry – An Overview. 2004;
9. Liang X, Hyyppä J, Kaartinen H, Lehtomäki M, Pyörälä J, Pfeifer N, et al. International benchmarking of terrestrial laser scanning approaches for forest inventories. ISPRS J Photogramm Remote Sens [Internet]. oct 2018 [cité 25 nov 2024];144:137-79. Disponible sur: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924271618301849>
10. Liang X, Hyyppä J, Kaartinen H, Lehtomäki M, Pyörälä J, Pfeifer N, et al. International benchmarking of terrestrial laser scanning approaches for forest inventories. ISPRS J Photogramm Remote Sens [Internet]. oct 2018 [cité 27 nov 2024];144:137-79. Disponible sur:

