

Mesures lidar et tomographie forestière

Marcel Bariou marcel.bariou@brasnah.fr¹

¹Brasnah sarl Mas Saragosse F-66170 Millas

Version finale du 18 décembre 2019

Résumé

Le présent article développe une approche complète de traitement automatique, de nuages de points LIDAR collectés en sous bois. Ces traitements sont effectués dans un pipeline de calcul. **Deux fonctions**, fondatrices, sont présentées, l'**identification (géolocalisation)** de chaque arbre dans la zone mesurée, l'**évaluation du diamètre de leur section**, pour chacune de ceux-ci, à différentes hauteurs. Les performances ciblées sont :

1. identifier (géolocaliser) tous les arbres avec un taux de fausse alarme (erreurs de première et seconde espèce comprise) $\leq 5\%$, dans la fourchette de diamètre de 20 cm à 120cm par pas de 10 cm,
2. fournir les positions relatives des arbres à +/- 50 cm dans une zone forestière,
3. donner les tailles (diamètres) de section à hauteur de poitrine avec une précision de +/- 10cm,
4. traiter, l'équivalent d'une zone mesurée de 1 ha peuplée de 400 arbres, en 30 mn en fournissant pour chaque arbre le couple d'attributs géolocalisation/diamètre.

Les algorithmes développés sont présentés, ainsi que le pipeline du processus de traitement mis en oeuvre. Ces traitements fournissent en sortie un jeu de données résultat exportable dans tout système d'information géographique ou une base de données géométrique. Cette approche est le fruit d'essais et d'apprentissages démarrés en 2018, les mesures datant de 2016 ont été conduites à l'époque sans protocole précis. Ceci a accru la nécessité de réflexions pour leur analyse et a conduit à certaines recommandations méthodologiques concernant la procédure de mesures et la calibration de la chaîne de mesures (Instrument + logiciel de création des fichiers *.las à partir des données de la centrale inertielle et la mesure du temps de vol) comme des logiciels et algorithmes de dépouillement (c.a.d. le résultat des présents travaux). Les travaux sont présentés de manière à faciliter l'élaboration de cahiers des charges pour le développement d'outils industriels (logiciels) spécialisés, sur la base des utilitaires et algorithmes développés. La cible de travail est d'aboutir, d'une part à un applicatif spécialisé autonome, d'autre part à un traitement automatisé en ligne. Ces aspects ne sont pas présentés dans l'article.

Où est l'erreur, dans le calibrage
ou dans la mesure ? Peut-être
dans les deux ?

L'arpenteur inconnu
Citation non datée ni géolocalisée

1 Introduction

1.1 Présentation et crédits

Les travaux présentés dans l'article, tentent de répondre, partiellement, aux attentes de l'équipe scientifique assurant le suivi de la Réserve Naturelle Nationale de la forêt de la Massane (**R.N.N. la Massane**). Il s'agit d'une hêtraie de 330 ha, située dans les Pyrénées Orientales à la frontière franco-espagnole. Une superficie de 10 ha, totalement protégée, fait l'objet d'un suivi scientifique permanent depuis plus de 100 ans. Les travaux les plus récents en lien avec les objectifs de mesure de la présente note sont présentés dans (1), (2), (3), (4).

Les travaux qui suivent ont été possibles par la mise à disposition de données de mesure LIDAR, par la Réserve Naturelle Nationale de la Massane, effectuées :

- en aérien par l'entreprise SINTEGRA (5) en 2016,
- en sous-bois par l'entreprise EXAMETRICS en 2016.

On y ajoutera un relevé de 20 points G.P.S. effectué par l'auteur et la R.N.N. de la Massane en septembre 2019, dans la zone d'étude. Bien qu'effectué avec des moyens modestes et peu précis, il a permis néanmoins d'évaluer l'opérateur de transformation comme nous le verrons plus loin.

Une première série de travaux, (6) et (7) , effectuée dans la cadre de la société **EXAMETRICS** a permis d'aborder le sujet, dont une recherche bibliographique importante (voir (6)), et de cerner des difficultés quant à la mise en oeuvre de certains algorithmes, afin d'en éviter les écueils ultérieurement, notamment dans la suite que nous leur avons donnée ici. Ces travaux ont été conduits avec la participation d'étudiants du Master CHIPS de l'Université de Perpignan Via Domitia (**U.P.V.D.**) et de l'**I.M.E.R.I.R.**

Tous les travaux, présentés ci-après, ont été effectués de manière exclusive avec des logiciels libres de droits et relevant de licences GPL, LGPL ou similaire. L'environnement de travail est bâti sur une station DELL Précision Tower 5810 (64 Go de RAM) sous Ubuntu 18-04 équipée d'un processeur CUDA Quadro Pro K5000. Parmi les principales bibliothèques de logiciel utilisées nous citerons : PDAL, LIBLAS, EIGEN3, le SDK C_CUDA, PyCuda. Des prototypes ont été effectués en langage Python et ré-écrits ensuite en C++ ou C_CUDA. L'outil **CloudCompare** permet de visualiser des nuages de points LIDAR et

d'en extraire des attributs dimensionnels ou de distance.

Sauf coïncidence, à nous indiquer, à notre connaissance, les présents travaux ne s'appuient pas sur une amélioration de techniques existantes et documentées. ils sont le fruit de nos apprentissages en technologie lidar et de notre expérience en géométrie de synthèse d'images 3D temps réel et de la mise en oeuvre de statistiques élémentaires et de filtrage d'images tous bien connus par ailleurs. Ils ne relèvent pas de la complexité de la géométrie algorithmique.

L'article est structuré strictement en respect de la chronologie des étapes du processus de traitement des données de mesure, tel que présenté sur la figure 1. Nous précédon, cette présentation, uniquement par un rappel succinct sur les techniques de mesures par Lidar et notamment le lidar mobile terrestre et les technologies qui y sont rattachées.

1.2 La forêt un espace de biodiversité et de vigueur végétale

La forêt et les bois, notamment ceux et celles qui sont laissés aux strictes caprices de la nature ou plus exactement à la volonté de chaque arbre de se développer se caractérisent par un foisonnement de la biodiversité. On y trouve de grands arbres qui ont su trouver leur espace vital. Ils se développent en co-habitat avec leurs pareils, avec une surface au sol suffisante, où de nombreux arbrisseaux et buissons tentent de s'installer en cherchant désespérément l'espace nécessaire. A défaut d'une croissance en hauteur les buissons s'installent et croissent masquant les sols. Les arbrisseaux, ceux qui survivent, s'entêtent avec une croissance lente. Au sol, de nombreux débris, bois secs issus de la croissance normale, ou de chute de fin de vie, alimentent toute une faune d'auxiliaires divers, en leur offrant des habitats. Que ce soit les arbres, en vie, ou chandelles fournisseurs de débris au sol ce sont autant de sources d'habitats divers pour toute une faune et insectes contribuant à la richesse de la biodiversité. Au niveau des arbres une activité fongique, des accidents de vie creusant des cavités autres lieux possibles d'habitat. Voilà quelques éléments de la richesse de la vie forestière. En matière d'arbre des essences peuvent prédominer parmi une diversité, mais la zone climatique privilégie certaines d'entre elles. Dans le cas présent il s'agit essentiellement d'une hêtraie. Mais en tout état de cause la diversité des objets d'intérêt scientifique est très étendue. Dans la présente étude nous nous intéressons uniquement aux arbres, encore faut-il les trouver.

1.3 Mesures en forêt macro et micro-observation

Les mesures satellitaires, radar et lidar, informent sur la canopée, voire plus dont le sol, avec des caméras hyperspectrales, multispectrales, leur résolution moyenne (au mieux, mètre ou décimètre mais en progrès constant) les classent dans ce que l'on peut appeler la macro-observation. Par contre, une activité

scientifique ou technique sur le terrain, qui s'attache à suivre le développement de ce biotope en observant les objets individuels de la forêt relève de la micro-observation détaillée. Outre l'observation directe, la collecte d'indices et/ou d'échantillons pour l'étude en laboratoire, des mesures physiques sont mises en place peu à peu. Les relevés d'attributs physiques des arbres se font à la main. L'évolution de placettes témoins, de faible surface au sol, recevant des unités d'essence locale, permettent par induction statistique de caractériser raisonnablement des ensembles forestiers plus grands. C'est une pratique courante en foresterie. Cependant, peu à peu la mesure s'automatise, les mesures météorologiques, avec toutes leurs palettes, ont été les premières venues, les jauges de contraintes permettront de suivre l'évolution des diamètres des troncs d'arbres en croissance, pour ne citer que les plus courantes. L'internet des objets va ouvrir la voie à tout un foisonnement de mesures (physique, biochimiques, etc...) qu'il s'agira de rattacher à un individu spécifique. Ainsi, que ce soit le forestier où le scientifique qui parcourt les espaces de forêt, leurs premières questions sont fréquemment :

- où est l'arbre ?
- quel est son état de croissance ?

Ce sont les deux premières questions auxquelles tentent de répondre les présents travaux. Mais elles seront le prélude à l'exploitation des possibilités à venir du foisonnement des mesures qu'apportera l'internet des objets.

1.4 Automatiser et généraliser la mesure dendrométrique

Dans la présente note nous introduisons les méthodes mises en place et les développements effectués pour extraire de l'information de collectes de données effectuées en sous bois avec un lidar mobile terrestre. Notre objectif ? Obtenir de l'information (données d'attributs dimensionnels d'arbre et leur géolocalisation) fiable. En première approche, les performances ciblées sont les suivantes :

- Collecte de données (avec le plein respect d'un protocole de mesure strict cf.paragraphe 4) en zone forestière accessible en sous bois, par un marcheur, avec un embroussaillage permettant néanmoins des lignes de marche espacées de 10 m. L'objectif est d'aboutir à la génération de fichier *.las, l'ensemble, en respect du protocole, pour un temps moyen de 2 heures par hectare (Mais à apprécier davantage en raison des contraintes méthodologiques).
- Dépouillement et traitement des données, identification des arbres (par leur géolocalisation), estimation de leur diamètre à des hauteurs au choix :
 1. génération d'un modèle numérique de terrain (M.N.T.) de la zone, mise des pieds d'arbres au niveau du relief zéro,
 2. identification de présence d'arbre avec un taux de fausse alarme inférieur à 5 % (erreurs de première et seconde espèce incluses),
 3. géolocalisation individuelle de chaque arbre de la zone avec une précision **absolue de +/- 10 m et une précision relative** de l'ordre du mètre

4. estimation du diamètre, **avec une précision de +/- 0.1 m**, pour chaque arbre, un arbre de diamètre inférieur à 20 cm est détectable mais sans garantie sur la valeur de son diamètre.

— exposition et exportation des résultats et mises en S.I.G.

Comme on le verra, la durée du processus de traitement est fortement liée à l'exécution de la détection de chaque diamètre par filtrage, durée qui va croissante en $\mathcal{O}(N^2)$ (N étant représentatif du ratio la surface à traiter sur la taille du filtre de détection), à défaut de précaution d'accélération des traitements. En standard nous conduisons 10 opérations de filtrage de diamètre de 0.1 m à 1.20 mètre, l'objectif est de dépouiller 1 ha par heure pour un peuplement moyen de 400 arbres (1 arbre tous les 5 m), soit tout compris, collecte des données et traitement, environ 30 secondes par arbre soit environ 3 heures par ha pour la globalité des opérations (Collecte des données + dépouillement).

Par ailleurs au-delà de la mesure, il s'agit de conduire ces dernières dans des conditions économiques attractives en permettant la traçabilité individuelle de chaque arbre, pour envisager de l'introduire communément dans la gestion forestière courante.

1.5 Relevé global de données et mesures non intrusives

La forêt est un corps vivant, il nous faut la pénétrer dans le détail pour mieux la connaître, l'usage du lidar permet cette découverte non intrusive en sous-bois. Les mesures associées donnent accès, dans un premier temps, à certains fondamentaux de chaque arbre (attributs dimensionnels, géolocalisation). Ces mesures pourront être enrichies d'une part et d'autres part elles peuvent s'associer à d'autres types de mesures (fournies par d'autres capteurs) ou observations afin d'accroître nos connaissances du monde forestier. Le lidar, notamment en sous bois, offre le grand avantage de pouvoir donner une identité à chaque arbre (sa position est unique sur terre) et à cette identité on peut y associer tous les attributs que l'on veut.

Les travaux qui sont présentés ici, constituent une modeste contribution à la mesure forestière. Particulièrement dédiés, dans l'immédiat, à l'automatisation des opérations de mesures dendrométriques, ils se donnent **cinq** objectifs :

1. Identifier et développer des protocoles de mesures LIDAR en sous-bois, afin d'atteindre une grande productivité de mesures fiables.
2. Extraire, du nuage de ces points mesurés, des données attributaires de base (diamètre à hauteur d'homme, géolocalisation), pour chaque arbre dans la zone mesurée, **dans les limites de performances indiquées**,
3. Porter au plus loin l'automatisation du processus d'analyse et de dépouillement du nuage de points, afin de pouvoir offrir un pipeline de traitements simple dans sa mise en oeuvre et accessible à une grande variété d'utilisateurs.
4. Poser les prémisses d'une offre de services en ligne.

5. Ouvrir la voie en surveillance environnementale, comme en exploitation forestière, à une capacité de suivi individuel de tout arbre, une fois identifié par sa géolocalisation, sur l'ensemble de son cycle de vie, en offrant la possibilité d'élargir progressivement l'éventail d'attributs pouvant lui être associé.

Ces travaux relèvent de la recherche et développement technologique en mettant en oeuvre des algorithmes déjà éprouvés par ailleurs mais en les adaptant spécifiquement au traitement de données issues d'un nuage de points LIDAR et en y **ajoutant des éléments originaux**.

1.6 Les partenaires du projet

Comme indiqué dans la paragraphe 1.1 le projet a démarré à l'initiative de la Réserve Naturelle Nationale de la forêt de la Massane dans les Pyrénées Orientales (R.N.N. la Massane) et de la société EXAMETRICS (St Estève , Pyrénées Orientales). Ils prirent la décision d'une étude exploratoire afin que la R.N.N. la Massane puisse envisager d'automatiser certains des relevés d'objets d'études (arbres, débris au sol, éléments d'habitat de la faune...) et notamment en premier lieu la géolocalisation de chaque arbre. A cet effet, la société EXAMETRICS a effectué, en sous-bois, au cours du second semestre 2016 un relevé LIDAR dans la zone protégée (gérée par la R.N.N. la Massane) de 10 ha. Par ailleurs et parallèlement un survol aérien avec mesure LIDAR également était effectué sur la même zone par la Société SINTEGRA, à la demande de la R.N.N. la Massane. Ainsi en fin 2016, la R.N.N. la Massane disposait de deux jeux de données LIDAR sur sa zone d'études de 10 ha :

- un relevé en sous bois,
- un relevé aérien.

1.7 Organisation de la publication

La note est structurée strictement en respect de la chronologie des étapes du processus de traitement, tel que présenté sur la figure ci-dessous. Nous la précédonns uniquement par un bref rappel sur les techniques de mesure par Lidar et notamment le lidar mobile terrestre et les technologies qui y sont rattachées.

1 - Acquisition sur terrain, données LIDAR et amers géolocalisés (lots de mesures de 15 à 20 mn). [Lidar Geoslam +GPS]	7 - Nettoyage des fichiers PNG et fermeture (75%) des enveloppes convexes de sections d'arbre : opération manuelle , faiblesse algo, à approfondir. [GIMP]
2 - Construction du fichier *.las et validation, taille : 1 à 3 Go conditionnée par la durée de la mesure. [Logiciel Geoslam + CloudCompare]	8 - Erosion morphologique, normalisant la densité, sur l'image *.png. [GIMP, G'MIC]
3 - Extraction du modèle numérique de terrain (pas de 50 cm) sur lot. Après transformation éventuelle (11) elle constituera l'empreinte au sol en S.I.G. [CreateMNT_KNN_Optimal_CM]	9 - Application des batteries de filtres décroissants en taille (120 cm à 20 cm), détection des pivots d'accumulation, effacement des sections détectées. [FILT_CIRCLE_STANDARD]
4 - Mise des pieds d'arbre des lots au relief Zéro (orthoprojection par retrait MNT). [Substract_MNT_CM]	10 - Élimination des doublons (pivots accumulation), avec arbitrage de diamètre sélectionné, extraction Z arbre dans MNT. [FILT_CIRCLE_STANDARD]
5 - Extraction d'une section, par lot, de 10 cm d'épaisseur, à 1.30 m de hauteur, parallélogramme, parallèle au sol. [Prj_Extract_Tile]	11 - Calcul des matrices de transformation, à partir des amers sélectionnés sur chaque lot. [WG84_2_RFG93]
6 - A partir des tranches extraites des lots création de fichiers images (*.png) par orthoprojection sur XOY. Résolution de construction 1cm / 1 px. [Create_PNG-X-Y-Zmoj]	12 - Transformation C.R.S (WGS84 => RFG93) des sections détectées par les matrices précédentes pour chaque zone et préparation des données attributaires pour mise en S.I.G. [Forest_Data_For_SIG]

FIGURE 1 – Le processus

Les caractères gras désignent, pour mémoire, les utilitaires développés ou les outils éventuellement employés :

1. outil de mesures : Lidar Geoslam, G.P.S Etrex Garmin
2. logiciel : Geoslam, CloudCompare, Gimp
3. utilitaires développés : Create_MNT_OTIMAL_KNN_CM, Substract_MNT_CM, Prj_extract_Tile, Create_PNG_X-Y-Z_MOY, Filt_Circle_Standard, WG84_2_RFG93, COMPUTE_Rot_Trans, Forest_Data_For_SIG

2 Rappel succinct des mesures LIDAR et de leur traitement

Communément un lidar s'appuie sur une émission de rayonnement monochromatique émis par un laser, dont il reçoit le ou les échos de retour. Les angles d'Euler de l'impulsion émise sont parfaitement connus, comme le décalage temporel de l'émission et de la réception, en conséquence l'instrument de mesure est en capacité de positionner tout écho dans un référentiel 3D identifié. En fournissant cette information très précise, il s'est substitué à la photogrammétrie classique, pour des relevés de points, l'évaluation photogrammétrique est remplacée par une véritable mesure sur le terrain. Il rencontre une certaine po-

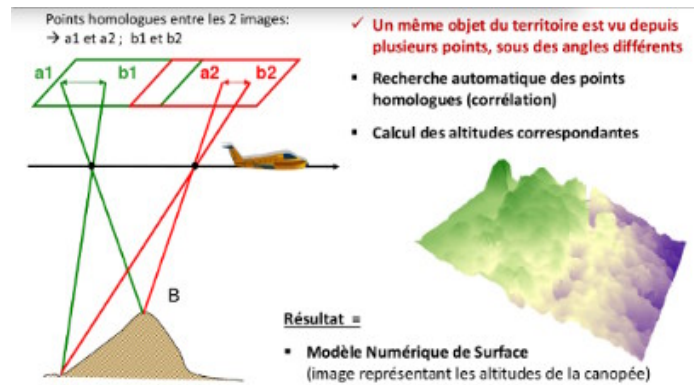


FIGURE 2 – Photogrammétrie, Crédit(IGN)

pularité pour des restitutions 3D où le qualitatif (l'esthétique) l'emporte sur le quantitatif (la mesure précise).

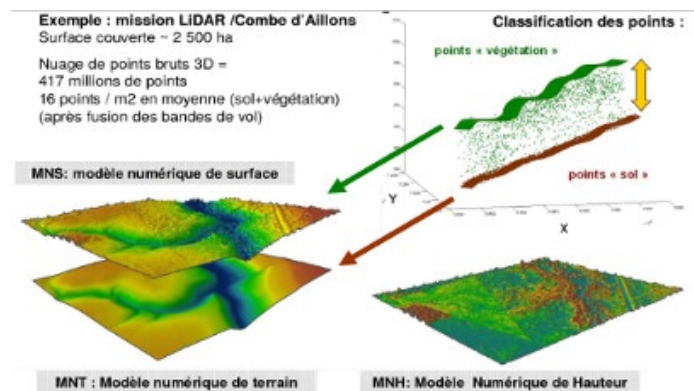


FIGURE 3 – Relevé LIDAR, Crédit(IGN)

Pour notre part, nous nous intéressons à la mesure. Elles sont faites avec un laser pulsé, dont nous recueillons que le premier écho de toutes émissions et il faut effectuer des mesures aussi précises que possible, sur des objets que nous devons, en final, localiser dans un nuage de points.

Ce dernier nous est fourni sans classification particulière, il nous appartient d'éliminer les points aberrants et de conduire les carroyages adaptés, 2D ou 3D afin de nous caler au mieux auprès des objets à analyser. Le traitement des objets 3D se fait particulièrement bien en passant en 2D (par des coupes), ce qui peut être assimilé à du traitement tomographique. En fait comme nous le verrons plus loin, ce travail se fait en 2D, donc sur une image, ce qui nous permet de nous appuyer sur des algorithmes très robustes de traitement d'images.

3 Environnement technologique



FIGURE 4 – Lidar mobile de mesure, Crédit(GEOSLAM)

Le LIDAR GEOSLAM figure : 4 utilisé par l'entreprise EXAMETRICS fournit les nuages de points que nous dépouillons. Ces caractéristiques principales sont données ci-après :

1. $\lambda = 905 \text{ nm}$, poids 1 Kg, déplacement : 3 à 4 km/h.
2. Zone de balayage éventail plan ouvert à 270° .
3. Rotation éventail (2 Hz) volumique ($270^\circ \times 360^\circ$).
4. Résolution 0.625° , soit 432 angles de tir.
5. Le balayage de l'éventail se fait en 10ms (100 Hz). cadence d'acquisition de 43 200 points par seconde.
6. Ambiguïté distance 3500 m (effacé par atténuation).
7. 1 seul écho collecté (le 1er par tir), donc pas de classification.

Sa structure de balayage du laser est un éventail horizontal, le laser est porté par une tête animée d'une rotation d'une fréquence de 2 Hz. Ces tirs laser, contenus dans une fraction de sphère renvoient des échos de manière totalement désordonnée, mais en respect du balayage.

Nous nous appuyons sur le format ***.las** standard de fait dans le monde du LIDAR (14). La construction du fichier ***.las** est effectué par un logiciel propriétaire lié à l'instrument de mesure et nous avons aucune maîtrise sur cet ensemble.

4 Acquisition des données forestières, méthodologies recommandées

La qualité, des données obtenues par le LIDAR et les mesures complémentaires, est liée au protocole respecté durant la campagne de mesure. Le lidar de mesure est équipée d'une centrale inertielle (composant électronique) qui a tendance à dériver avec le temps, aussi est-il recommandé d'éviter des acquisitions d'une durée supérieure à 20 mn, entre deux recalages de la centrale inertielle. Par ailleurs 20 minutes de relevé, c'est 54.10^6 points à raison de 16 bytes par point soit environ 900 Mo de données. Quelques recommandations :

1. Se munir d'une carte I.G.N. ou équivalent et planifier le parcours physique en quadrillant les zones, sur un outil cartographique quelconque, en identifiant chaque zone relevée après un recalage de la centrale inertielle.
2. Se munir de mètre ou décimètre ruban, télémètre laser (une précision proche de quelques cm) et GPS différentiel. Les mesures au sol sont nécessaires, en utilisant le télémètre, ceci permettra de lever certaines ambiguïtés lors des dépouillements, le mètre ruban permettra de relever des circonférences témoins de section d'arbres bien identifiés, à hauteur de poitrine, pour les raisons citées. Un G.P.S. différentiel, permettra d'assurer les localisations de triangulation obligatoires, avec une précision proche de quelques cm.
3. A chaque relevé, recalage l'I.M.U. (Inertial Module Unit), en posant le lidar sur un trépied (lui-même géoréférencé).
4. S'assurer de l'horizontalité du LIDAR lors du recalage.
5. Orienter le LIDAR axe Nord/Sud pointé vers le nord.
6. Relever la position G.P.S. initiale (Position du trépied) (si nécessaire trouver le lieu de captation satellitaire, un G.P.S. type Etrex Garmin peut faire l'affaire dans un premier temps, le luxe du différentiel est vraisemblablement une nécessité),
7. Identifier tout amer (Naturel, par photo, réflecteur LIDAR, posé au sol avec localisation G.P.S. obligatoire) , nécessairement détectable dans le nuage à venir, relever au moins 5 points d'amers (qui peuvent être aussi des arbres singuliers aisément identifiables dans un nuage de points) couvrant au mieux la zone mesurée et avec la meilleure précision possible. Ces cinq points de relevés GPS, sont relevés de manière à construire des vecteurs aussi grands que possibles, non colinéaires et orthogonaux si possible pour 2 d'entr' eux (cf. 11.1).
8. Toute localisation G.P.S. d'arbre est à faire au pied de celui-ci et au sud de l'arbre (par ex.) pour préserver les cohérences de mesures.
9. Si agrégation (à éviter si possible) à venir envisagée, chevaucher 10 à 20% du relevé antérieur avec points homologues (et amers) communs entre relevés N et N+1.
10. Autant que possible relever point de départ et final G.P.S.

11. Bien référencer le relevé et ses données associées (toutes informations pertinentes pour le positionnement).
12. Créer une grille de remontage des nuages sur le plan initial en référençant parfaitement les zones.

Ces remarques sont fournies ex-post, car les travaux de dépouillement ont fait apparaître ces prérequis à respecter, afin de faciliter l'extraction des données.

5 Extraction du modèle numérique de terrain

Le lidar mobile terrestre GEOSLAM, du fait de son mouvement rotatif perpendiculaire au sol, offre l'avantage de fournir de nombreux points au sol. Une population de points aussi riche permet une extraction statistique fiable des données propres au terrain. La connaissance du modèle numérique du terrain (M.N.T.), son relief, est fondamental dans le cadre des mesures que nous effectuons, car de lui dépend la précision des mesures verticales d'arbres que nous calculons.

En effet, dans le cadre particulier de la forêt de la Massane, le relief est très accidenté. Donc le seuillage global en Z (altitude) ne présente aucun sens physique sur les relevés initiaux, d'où la nécessité d'une connaissance fine du terrain. Dans un cadre très général, ceci s'avère également nécessaire pour les mêmes raisons. Par ailleurs, dans les mesures dont nous disposons, relevés Sintégra, les MNT déduites souffrent d'une résolution insuffisante, plusieurs raisons possibles. Nous en citerons deux vraisemblables. la résolution de mesures et les règles d'interpolation adoptées en lien avec le choix de la résolution, sont insuffisantes. En conséquence, il nous fallait reconstruire cette M.N.T. avec une bien meilleure résolution, nous avons fait le choix de construire des cellules de $50cm \times 50cm$.

Au vue du nombre d'échos au sol ($\geq 5\%$ de la population des points), une extraction statistique du modèle de terrain est possible. Ceci permet également d'envisager une substitution de nos relevés à ceux d'un vol aérien avec lidar multiécho classifiant (Economie importante en terme de coûts!).

Nous avons travaillé sur l'ensemble du nuage de points (cf. figure : 5), de la zone, dont les points totalement aberrants sont retirés. Dans un premier temps nous nous sommes donnés les règles suivantes :

- Tuilage (carroyage) nécessaire avec un encombrement $50cm \times 50cm$.
- Respecter largement l'espacement des arbres.
- Accepter des arbres de 6 m de circonférence (1m de rayon).

Les traitements que nous proposons, nécessitent deux lectures en fichier :

- une première lecture permet d'extraire l'encombrement au sol de la zone mesurée (nuage de point) et de définir les limites du carroyage,
- la seconde lecture assure le calcul de l'index de chaque point et en conséquence son affectation à la bonne cellule et son association statistique idoine.

L'ensemble de la procédure d'affectation cellulaire est décrite ci-après. Après quelques essais, nous sommes passés d'une résolution de $2m \times 2m$ à une résolution de $50cm \times 50cm$, en adoptant le centimètre comme unité de mesure et non le mètre. Nous avons respecté les étapes suivantes de traitement :

- Établir l'encombrement précis de la zone (MinMax X, Y) et les règles de carroyage.
- Effectuer un carroyage (X, Y) avec les attributs collectés par cellule :
 - min, max de la cellule sur (X, Y),
 - nombre de points LIDAR dans la cellule,

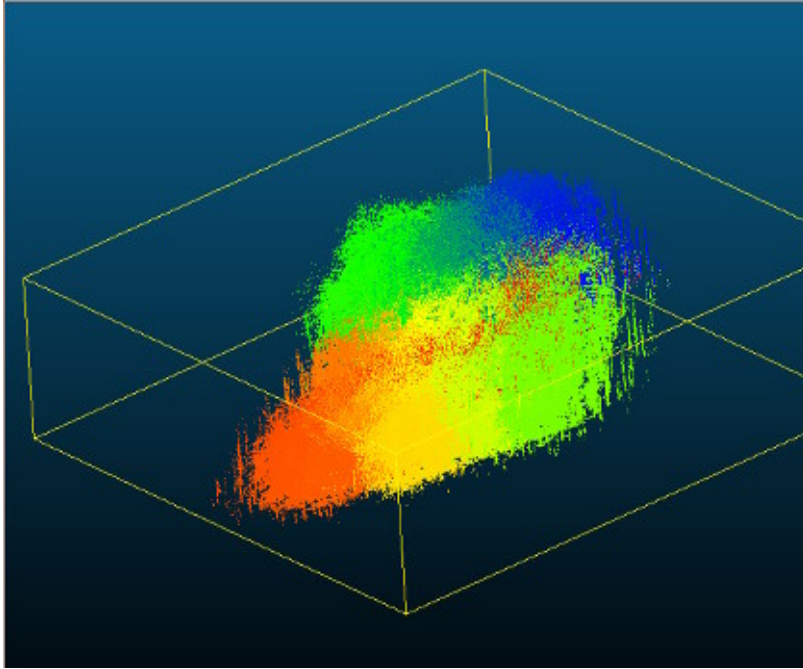


FIGURE 5 – Vue isométrique du nuage de référence dans son parallépipède d'encombement

- valeur moyenne de l'altitude Z (meanZ),
- valeur médiane de l'altitude Z [medZ], mais non utilisée,
- écart-type de l'altitude Z.

Pour l'affectation des points dans la bonne cellule, nous avons adopté les règles suivantes, pour éviter toutes opérations récursives et effectuer un traitement à la volée en une seule passe de lecture de fichier :

- Établir l'encombement précis de la zone (MinMax X,Y) traitée.
- Définir, le pas de carroyage étant connu, les bornes Sup. et Inf. de parcours pour les coordonnées [X, Y]
- Être capable de faire un carroyage 2D (cellule) et 3D (voxel) selon les besoins.
- Eviter les opérations récursives, le résultat doit être en accès direct en mode aléatoire, l'adressage se fait par un index construit en concaténant ses coordonnées (X, Y) [cellule] et (X, Y, Z) [Voxel] modulo le pas de carroyage selon l'axe de coordonnées.
- Définir l'affectation du point, dans la bonne cellule par l'index de cellule déduit des coordonnées du point comme indiqué, ci après :
 - $X_{modulo} = [(int)(X_{réel} / f_{pas})] * I_{pas}$. (I entier, F flottant)
 - $index = X_{modulo}! Y_{modulo}! Z_{modulo}$

Ainsi dans un triède direct (cf. fig. 6) on peut rassembler les points LIDAR dans

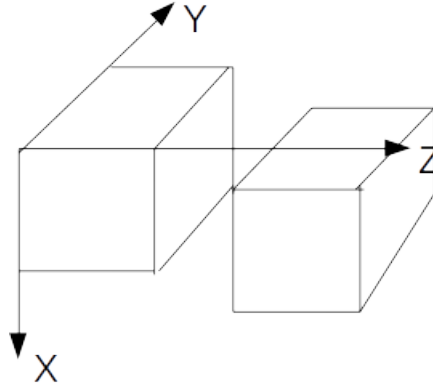


FIGURE 6 – Construction carroyage 2D, 3D avec statistique de points par cellule

une cellule(2D) ou un voxel(3D) et avoir un accès direct et rapide de manière aléatoire sans construction récursive d'octree. Ceci est grandement facilité en C++ par l'utilisation de l'objet MAP<index, item> qui se prête totalement aux accès aléatoires. La construction de l'index de cellule (son identifiant) s'avère aisée par une opération modulo le pas de cellule, selon les différentes coordonnées de cette dernière. Tout point respectant cet index est affecté à cette cellule.

A l'issue de cette opération, nous avons une vision de notre nuage initial organisé en cellule de $50cm \times 50cm$ et non plus de points élémentaires. Nous disposons de statistique au niveau de chaque cellule, nombre de points, $Z_{min}, Z_{max}, Z_{moy}, \sigma_z$, donc :

- Chaque point présent dans la cellule contribue aux statistiques sur l'attribut Z (altitude)).
- Tous les points du nuage ont été classés dans une cellule.
- On présume benoîtement d'une distribution normale (A approfondir) des altitudes.
- On retient 5% de la population tel que $Z_{max} (Z_{mean} - 2 \times \sigma_z)$ et on fait l'hypothèse que c'est le sol.
- On impose une densité minimale (nombre de points par cellule) pour fiabiliser le calcul (critère à préciser), à cette fin il est construit un vecteur des cellules éligibles.

A l'issue de cette classification, on effectue une troisième passe de traitement, avec nouvelle lecture de fichier, en respect des critères précédents :

- Le point doit se trouver dans une cellule éligible par densité,
- Sa coordonnées Z est $\leq (Z_{mean} \sim 2 \times \sigma_z)$, ce qui pré-suppose de son appartenance au sol.

On repeuple ainsi une nouvelle carte (objet MAP C++) de cellules ne contenant que des points présumés appartenir au sol, Les données statistiques Z_{mean} et σ_z sont calculées à nouveau pour chaque cellule. Un traitement de filtrage, permet de lisser les disparités de voisinage, par ajustement de la moyenne. Ce traitement

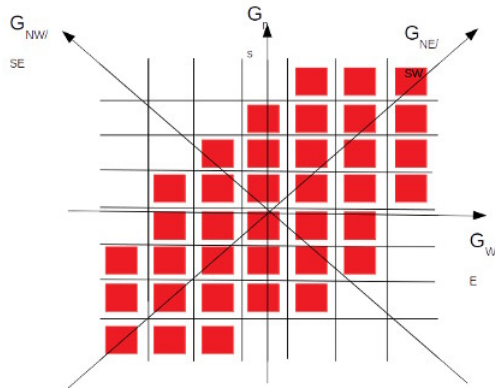


FIGURE 7 – Orientation d'évaluation des coefficient de gradient de dénivellé

est assuré par un filtre convolutionnel normalisé 9×9 . Sachant que les coefficients de pondération (cf. figure : 7) de calcul de la cellule centrale sont déduits des gradients de dénivellé global (sur l'ensemble de la zone) dans les directions :

- nord/sud,
- est/ouest,
- sud-ouest/nord-est,
- sud-est/nord-ouest.

Le calcul des gradients est à envisager sur une zone plus réduite. Cette suite d'opérations donne le modèle de terrain présenté sur la figure : 8.

Par contre, le filtre de lissage est sans influence sur le périmètre de la zone, où on voit apparaître des cellules aberrantes.

Comme on le voit sur la figure 9, les cellules aberrantes sont éliminées par un filtre de voisinage KNN :

- Filtre 9 cellules (3×3),
- On élit la cellule centrale si :
 - constat de mitoyenneté (plan xOy) avec au moins deux autres cellules élues en densité,
 - différence d'altitude, entre cette cellule centrale et la cellule mitoyenne concernée, inférieure ou égale à la résolution au sol (taille de la cellule, ici 50 cm). Ceci nous permet d'aboutir au M.N.T suivant où les aberrations périmétriques sont retirées.

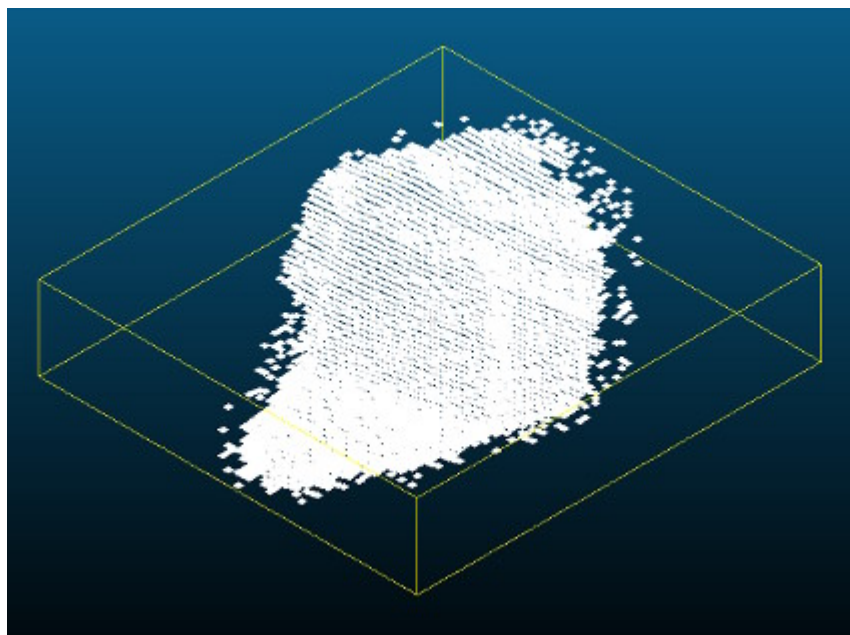


FIGURE 8 – Modèle de terrain après lissage par le filtre de gradient

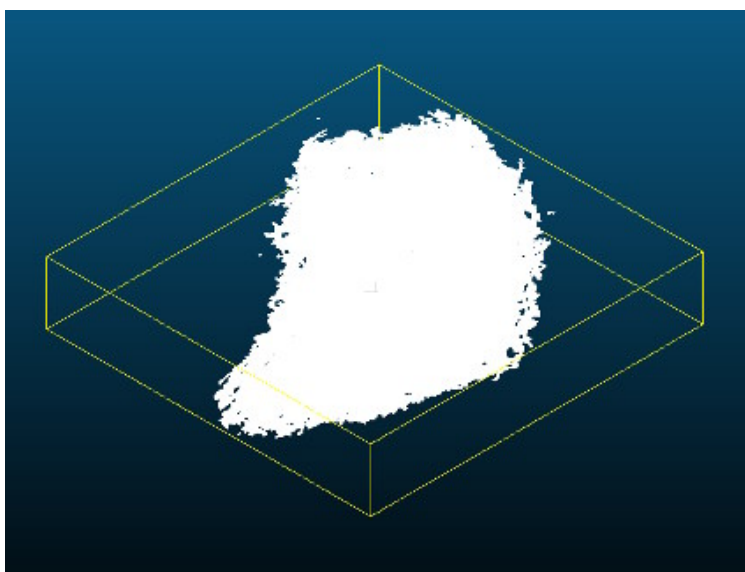


FIGURE 9 – Modèle de terrain après lissage par le filtre Knn

6 Mise au relief zéro et coupes tomographiques

Ci dessous (cf. figure : 10), le M.N.T habillé par le nuage de points initial.

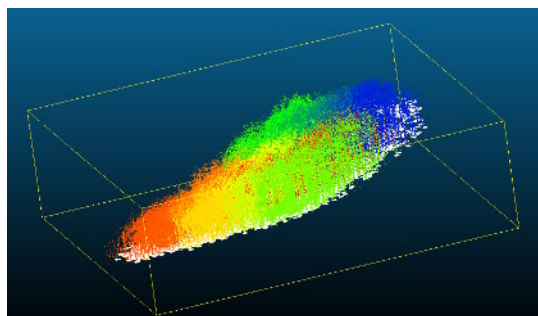


FIGURE 10 – Modèle de terrain habillé par le nuage initial

Une fois que nous disposons du modèle numérique de terrain la mise au relief du nuage initial est le fruit d’une simple soustraction entre le fichier du nuage initial et le fichier du M.N.T. (cf. figure : 11). Dans les figures ci-dessous, les couleurs sont pour la première image représentative des heures de relevées et pour la seconde de l’altitude

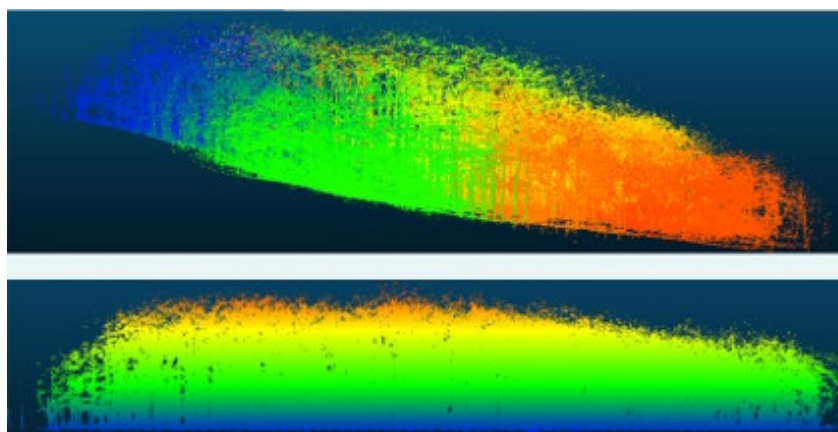


FIGURE 11 – Nuage de point avant et après mise au relief zéro

Comme on le voit sur l’image ci dessus, il est maintenant possible de travailler de manière uniforme et homogène sur la hauteur des arbres par rapport au sol qui les porte. A cette fin , nous pouvons procéder à des extractions parallélépipédiques, selon la géométrie de notre choix pour identifier des arbres ou section d’arbres selon des découpages horizontaux (cf. figure : 12) ou verticaux (cf. figure : 13). Ce relief normalisé à Zéro, nous donne la possibilité de conduire des coupes tomographiques (sections), suivant les trois plans de coupe ZOY, ZOX, XOY en se déplaçant sur leur normale respective $\vec{I}_x, \vec{J}_y, \vec{K}_z$, à l’ordonnée de notre choix. La figure 12, extraite d’un écran CloudCompare, présente une section horizontale d’une fraction [60m x 35 m] de la zone initiale et sur laquelle



FIGURE 12 – Exemple de section horizontale de nuage au relief zéro

on distingue parfaitement un arbre couché au sol et de nombreuses enveloppes convexes (pseudo cercles) qui sont, en fait, des sections d'arbres à 70 cm du sol. Ce sont nos premiers objets d'intérêt.

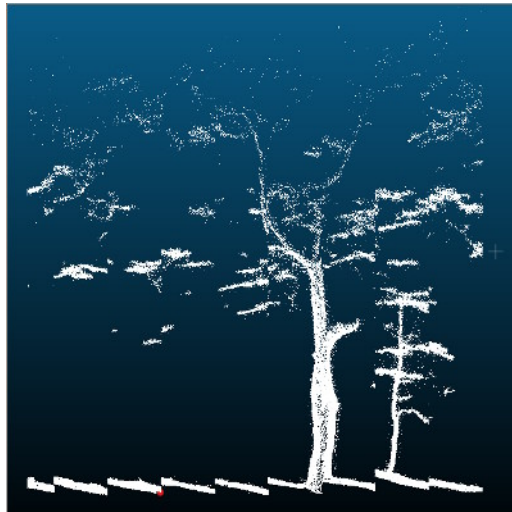


FIGURE 13 – Exemple de section verticale de nuage au relief zéro

La figure 13, extraite également d'un écran cloud compare, présente une section verticale d'arbre, localisée dans une zone de notre choix lors de la définition du parallélépipède d'extraction. On notera au pied de l'arbre l'amélioration né-

cessaire du gradient de filtrage pour le M.N.T. Ceci laisse augurer de toutes les possibilités de traitement que nous pouvons envisager de conduire.

Ces sectionnements tomographiques nous permettent de construire des images *.png ou autres pour la conduite des futurs algorithmes de classification et ou de reconnaissance de forme en section horizontale ou verticale. Les projection sont conduites sur l'un des trois plans ZOY, ZOX, XOY, selon les besoins, l'axe de projection étant leur leur normale respective $\vec{I}_x, \vec{J}_y, \vec{K}_z$. Ceci nous permet de transformer notre traitement d'un nuage de points 3D en du traitement d'images 2D.

7 Sectionnement et création d'image

Donc, afin de simplifier les traitements et de pouvoir s'appuyer sur des technologies éprouvées, comme expliqué précédemment, le nécessaire est fait pour travailler en mode image et en 2D, en utilisant des projections orthogonales adaptées. Les coupes tomographiques réalisées permettent de déboucher sur deux méthodes complémentaires de définition des attributs d'arbres :

- Les coupes verticales nous permettent de construire des histogrammes de densité selon l'axe des Z et de construire des profils morphologiques individuels pour les arbres, permettant de quantifier par exemple la volumétrie du bois d'oeuvre comme celle de la biomasse. Cette exploitation de données fait clairement partie des études à venir.
- Les coupes horizontales mettent en évidence des sections d'arbre variables selon la hauteur, ces plans de coupe sont transformés en fichiers image (JPEG, PNG) sur lesquels nous appliquons des filtres de comptage circulaire du nombre de pixels ce qui nous permet de procéder à une classification du diamètre des arbres aux hauteurs de sections, avec une précision de +/- 10 cm. Cette approche est issue d'une tentative d'application de la transformée de Hough circulaire (cf. (8) qui s'est avérée imprécise, sujette à un grand nombre d'erreur du fait :
 - de la faible similarité circulaire des sections,
 - de fréquentes non fermeture des enveloppes convexes de section.

En conséquence d'autres approches étaient nécessaires afin de permettre l'identification (localisation et mesures) des pseudo cercles (enveloppe convexe) de sections d'arbre, nous avons adopté une approche déterministe de corrélation par fenêtre glissante de la taille des diamètres recherchés sur les images de sectionnement horizontal. Par ailleurs, afin d'accroître la probabilité de la fermeture des enveloppes convexes, nous avons accru l'épaisseur verticale des sections horizontales ce qui a pour effet d'accroître la densité de points projetés au sol. Les fichiers images étant normalisés, en terme de géolocalisation, on retrouve aisément la localisation géographique précise sur les pics de corrélation, en utilisant la méthode du pivot d'accumulation explicitée plus loin (Paragraphe 10.3), afin de bien raffiner cette position.

8 Construction des fichiers image, normalisation, réduction de bruit

La transformation brut, par projection sur le plan XOY du parallépipède extrait du nuage de points, fournit une image bruitée. Les trois figures qui suivent donnent au calage près et dans l'ordre :

- Un nuage de point (écran CloudCompare) en vue de dessus d'une épaisseur en Z de 30 cm, les objets d'intérêt sont les sections pseudo circulaires qui correspondent aux troncs d'arbres sectionnés horizontalement au dessus du sol, des arbres couchés, le reste étant des échos de feuilles ou branches voire du bruit de mesure.
- Le même nuage de point projeté dans le plan XOY, image PNG extraite par calcul de projection au sol du nuage de points pour une section de 30 cm à une hauteur donnée.
- la même image débruitée, projection du même nuage de point nettoyé et présentant les seuls objets d'intérêt (enveloppe convexe) dont on extraira automatiquement, la position (X,Y,Z) transformable en RFG 93, et le diamètre selon le filtre employé



FIGURE 14 – Exemple de section horizontale de nuage au relief zéro

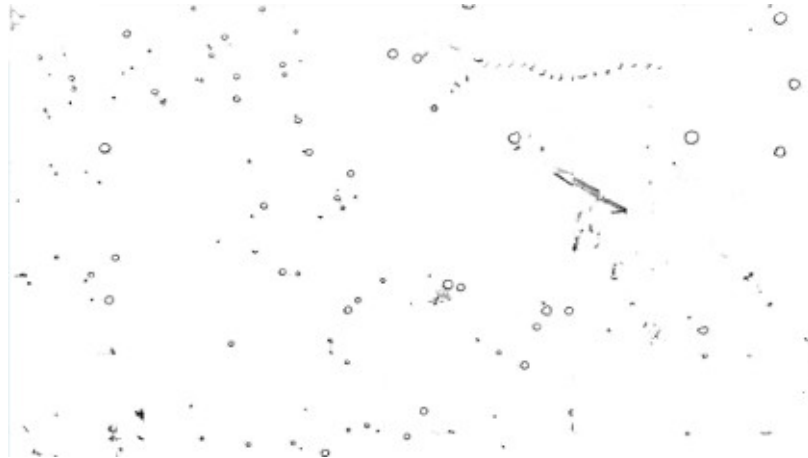


FIGURE 15 – Exemple d'image brute générée

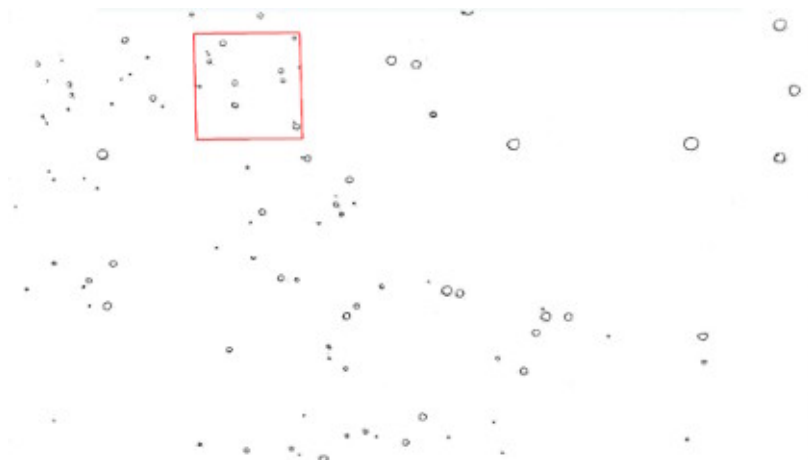


FIGURE 16 – Image précédente débruitée

9 Erosion morphologique et bibliothèque de section d'arbres

Selon la qualité des relevés sur le terrain, la densité de points sur l'enveloppe convexe d'une section d'arbre peut s'avérer insuffisante. Dans le futur, ceci pourra être corrigé pour partie, par le respect d'une méthodologie stricte en matière de relevés sur le terrain. mais dans l'immédiat un noyau d'érosion a permis d'améliorer artificiellement la densité des points projetés, un noyau carré d'érosion $(1,0,1; 0,2,0; 1,0,1)$ a été mis en oeuvre, avant de traiter l'image. Les section d'arbres projetées au sol sont des sections pseudo circulaires dont les

collections d'enveloppes convexes pourraient permettre, à terme de construire des bibliothèques de formes, pour l'apprentissage machine. Mais en l'état actuel de nos travaux, nous ne disposons pas de suffisamment de formes, pour nous engager dans cette voie. Cet axe de travail qui fut envisagé dans (7), pourra reprendre l'apprentissage profond en s'inspirant des travaux de (9). Ceci sera abordé dans des études ultérieures. Les figures ci après donne un aperçu de la diversité d'enveloppes convexes, représentative des sections d'arbres. Nous en donnons l'aspect avant et après érosion pour une grille d'exemples.

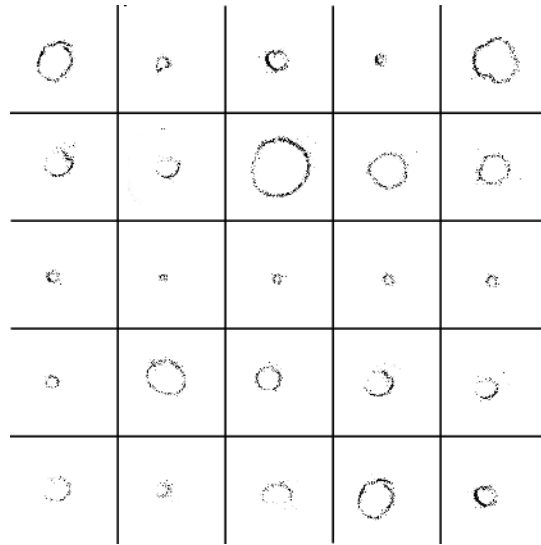


FIGURE 17 – Exemple d'enveloppes convexes de sections d'arbre

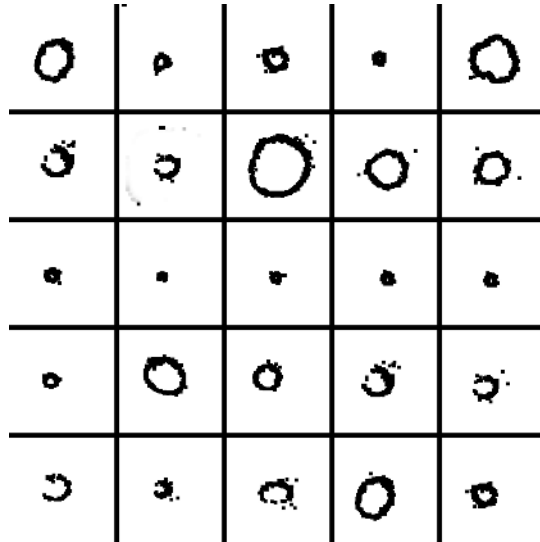


FIGURE 18 – Exemple d’enveloppes convexes de sections d’arbre après érosion

10 Localisation et évaluation des diamètres d’arbre

10.1 Technique de filtrage mise en oeuvre

Nous assurons, le mode de détection des arbres, dans une image, par un filtre circulaire de corrélation. Les caractéristiques principales, à retenir, de ce filtre sont :

- C’est un filtre glissant, le pixel est équivalent au centimètre.
- Le principe de filtrage repose sur du comptage de pixels communs entre le filtre et l’image à une position de pixel donnée de l’image et non sur la contribution pondérée du voisinage, c’est de la détection binaire et du comptage aboutissant à un histogramme surfacique, il peut être présenté comme une image raster dont les pics de corrélation (figure 20) soulignent une présomption de présence d’arbre.
- Un paramètre d’ajustement lié à la taille du filtre (diamètre de l’arbre) élit ou non une sortie de filtre comme présomption de présence d’arbre d’un diamètre donné.
- Plus la taille du diamètre d’arbre recherché se réduit, plus le temps de traitement croît comme le carré du ratio de la taille de l’image sur la taille du filtre. En conséquence, des mécanismes d’accélération sont mis en place pour quitter rapidement toutes les zones à faible densité de pixels ou sans pixels.
- À chaque point élu, on retient sa position dans l’image et le nombre de pixel d’intersection entre le filtre et l’enveloppe convexe.

- La stratégie de filtrage recommande de faire les traitements de détection en commençant par les filtres de plus grands diamètres et en progressant par taille décroissante.
- À l'issue du traitement d'un diamètre donné, les enveloppes convexes de l'image propres à ce diamètre sont effacées de l'image en cours de traitement, de manière à ne pas créer des ambiguïtés avec les filtres pour petits diamètres.

La figure ci dessous donne :

- image 1 : un exemple d'enveloppe convexe après érosion,
- image 2 : un filtre adapté à cette enveloppe convexe,
- image 3 : intersection du filtre avec l'enveloppe convexe, ne donnant pas de pic de corrélation,
- image 4 : position du filtre donnant un maximum pour le pic de corrélation, les coordonnées du pic de corrélation correspondent à la position du centre du filtre dans l'image traitée.

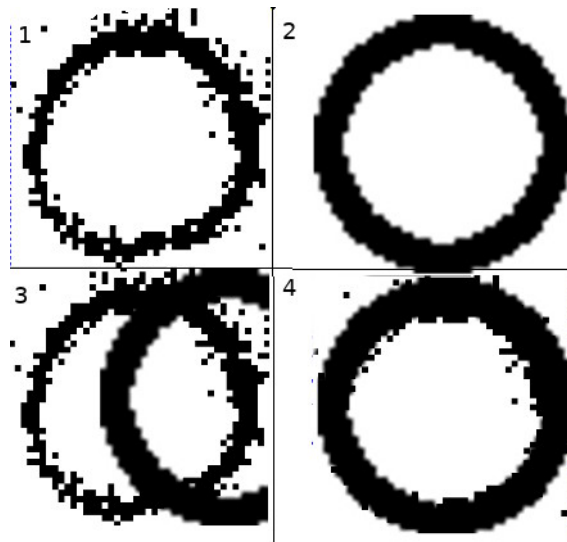


FIGURE 19 – les éléments de détection d'arbre par filtrage de diamètre

10.2 Construction du filtre et modalités d'usage

Le filtre est une couronne circulaire de 4 pixels, centrée sur le diamètre de référence D que nous recherchons dans l'image. En conséquence le filtre se présente comme une image carrée dont le côté mesure (D diamètre en cm + 4 cm). En effet dans nos mesures, nous avons pris le centimètre comme référence et dans nos images 1px équivaut à 1 cm. En conséquence le filtre de détection des diamètres de 80 cm est une image carrée de 84 px de côté. Codé en niveau de gris (2 valeurs 0, 255), il se présente sous la forme d'une couronne circulaire,

centrée, de 4 px d'épaisseur et de couleur noire, sur fond blanc.

Comme nous l'avons présenté, une section d'arbre n'est pas parfaitement circulaire. Notre filtre identifie au mieux la proximité de diamètre et une fois les pivots d'accumulations localisés, un contrôle complémentaire et rapide assure le meilleur classement entre 3 diamètres possibles : **D**, **D+10cm** , **D-10cm** pour la position identifiée, ceci contribue également à notre tolérance à +/- 10 cm, sur le diamètre.

10.3 Recherche des pivots d'accumulation

Le filtrage précédent, élit un certain nombre de points comme pics de corrélation. La figure 20, présente à gauche l'image raster résultant d'un filtrage à un diamètre de 30 cm, où les points clairs correspondent aux pics de corrélation. A sa droite, un exemple de pic de corrélation [60, 110], où l'accumulation se fait dans un voisinage de 8 à 10 px autour du pic (**1 pixel vaut 1cm**). Cette caractéristique de voisinage est utilisée pour les élections de points. En fait, il s'agit d'amas de points entourant la zone où il y a une forte présomption de présence d'un arbre de la taille du gabarit du filtre. Cet amas se trouve généralement dans une zone circonscrite de quelques pixels dans l'image de corrélation. Le raster de corrélation est un archipel d'amas, dont il s'agit de trouver pour chacun son centre de gravité qui correspondra à la position effective d'un arbre du diamètre donné par l'attribut du filtre. Le principe du pivot d'accumulation est très simple pour le traitement que nous allons décrire :

- un tampon A a reçu les points élémentaires de l'ensemble des amas,
- un tampon B (vide à l'origine) qui travaille en bascule (flip-flop) avec A reçoit tous les points non liés au pivot courant,
- un tampon C fait l'accumulation pondérée des coordonnées des points liés au pivot, la pondération est assurée par le nombre de points liés à la sélection du pivot,
- c'est strictement un calcul barycentrique,
- le parcours du tampon A étant épuisé (A est vide), B contient tous les points d'amas non traités, on effectue le calcul du barycentre des données de C, on préserve le résultat, on vide C, on permute les fonctions de A et B (bascule) et on reprend l'opération avec le nouveau tampon des points élémentaires des amas non traités
- on poursuit cette suite d'opérations jusqu'à épuisement des amas.

Les amas sont des groupes de points d'accumulation séparés au plus par une distance de D pixels (8 à 10 px). Lors du parcours du tampon des amas à traiter, le premier point rencontré devient le pivot et on retient tous les points à une distance **d** ($d \leq D$) et leur accumulation nous permettra de calculer le barycentre de l'amas courant, c'est à dire la position de l'arbre.

A l'issue de ce traitement nous disposons pour chaque arbre identifié :

- de son diamètre de section à la hauteur d'extraction du nuage calé au relief Zéro,
- de sa localisation (X,Y) en pixels dans le référentiel de l'image normalisée,

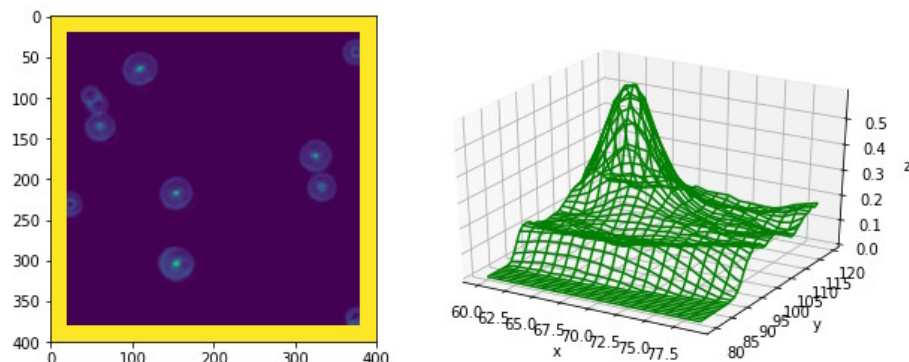


FIGURE 20 – Image raster résultante de la corrélation et exemple de pic de corrélation

- de la possibilité de déduire ses coordonnées (X,Y) dans le nuage de points source préalablement projeté dans le référentiel RFG93,
- de la possibilité de connaître son altitude, en interrogeant le fichier de M.N.T.

Il nous reste, par une transformation géométrique à assurer le positionnement des arbres identifiés à leur juste place en utilisant l'opérateur de transformation, dont nous donnons plus loin le mode d'évaluation.

10.4 Elections finales et retrait des doublons

Notre filtre construit un amas de points de vraisemblance de présence d'arbre, au diamètre du filtre. Chaque point de l'amas (calé sur la position centrale du filtre glissant à une position donnée) est lui-même caractérisé par le nombre de points d'intersection qu'il représente entre le filtre et la section d'arbre présumée. Le calcul du barycentre des points appartenant à cet amas (dans un voisinage de 7 px), nous donnera au mieux le centre de la section d'arbre présumée. Une fois que nous avons cette position, le comptage direct en calant précisément les filtres **D+10cm** et **D-10cm** est immédiat, ceci nous permet de faire une élection entre 3 diamètres. Nous retenons celui représenté par le filtre qui collecte le plus de points en étant calé sur le barycentre précédent. Par ailleurs, les données d'arbres (limitées au seul diamètre actuellement) sont rangées dans une table indexée par la position, ce qui exclut tout doublon.

Enfin, nous pratiquons une recherche par diamètre décroissant, une fois une section d'arbre classée à un diamètre donné, nous l'effaçons de l'image, ceci permet d'accélérer (les zones vierges en points sont sautées) les opérations de filtrage très coûteuses en temps. Une construction par listes liées des seules zones contenant des points par des algorithmes et leur variante de type KD-Tree, R-tree doit être envisagée dans les travaux ultérieurs pour accélérer les calculs.

11 Calcul de l'opérateur de transformation sur chaque lot de mesure

11.1 Contrôle préalable des mesures de recalage au sol

Fondamentalement, le problème à traiter relève de l'opération désignée communément par le barbarisme "registration" qui consiste en bon français à recaler deux nuages de points ayant des éléments communs. A priori l'un des nuages est considéré comme fiable, représentatif de la réalité. C'est la référence ou la cible, et il est supposé être défini, avec la meilleure précision possible dans le bon référentiel, autrement dit le bon "datum" en matière de géographie et ou géocalisation. L'autre nuage, défini dans le même référentiel est lui mal positionné, il s'agit de le recaler correctement par une opération associant 1 translation et 2 rotations. Considérant qu'au sein de ce nuage de points, les mesures relatives sont correctes, on opère une transformation rigide. Pour être précis, nous allons considérer que les données recueillies par l'instrument de mesure, données à recaler, constituent le **nuage source**. Par contre les relevés G.P.S effectués sur le terrain vont constituer le **nuage cible**. La figure 21 en donne une représentation stylisée. **Ns** désigne le nuage source et **Nc** le nuage cible.

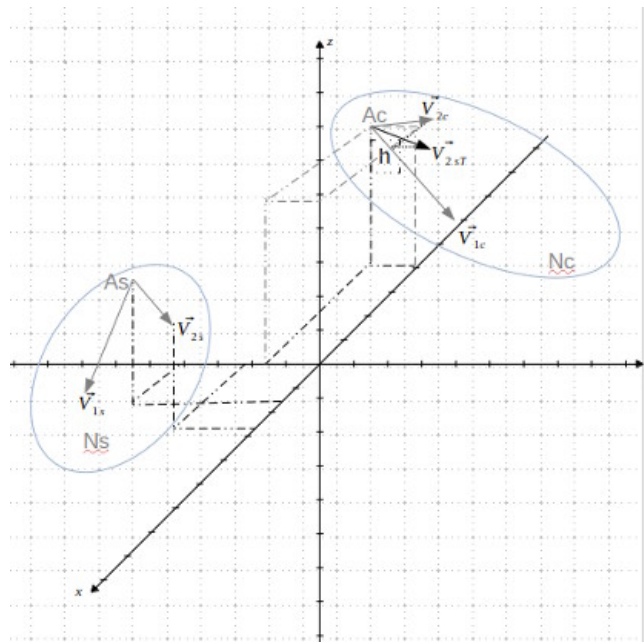


FIGURE 21 – Nuage source et nuage cible

Les données recueillies par un LIDAR mobile terrestre, sont géolocalisées sur la base d'une construction exploitant des données accélérométriques et gyrométriques fournies par la centrale inertielle équipant le LIDAR. Cependant

ces données de géolocalisation sont données dans le référentiel de l'instrument de mesures LIDAR qui est calé à l'origine 0, 0, 0 mais en respect du système de référence des coordonnées propres à l'appareil(WGS84 dans le cas présent soit srid 4326). En effet, ce type d'instrument mobile est dédié, entre autres, à des mesures dans des zones ne bénéficiant pas d'une réception GPS permanente et de qualité. C'est le cas en environnement forestier, mais ici l'occultation du signal G.P.S n'est pas permanente. Ceci nous permet des relevés ponctuels de géolocalisation (cf. paragraphe 4 qui détaille les règles facilitant les recalages à venir).

Comme indiqué, dans le paragraphe 4, les mesures sur terrain sont associée à des relevés de points G.P.S singuliers, faisant office d'amers dont on pourrait, a priori, identifier les homologues aisément dans le nuage de points résultant de la mesure LIDAR. En effet il est nécessaire de recalcr correctement le nuage de points de mesure dans le référentiel géographique avec lequel nous voulons travailler. L'instrument de mesure LIDAR, doté de sa centrale inertielle, fournit le nuage source. A contrario, les relevés par G.P.S. constituent des données du nuage cible. Cependant, dès maintenant, deux aspects sont à prendre en ligne de compte :

1. pour chaque point mesuré, par G.P.S., ils sont donnés dans un format lié à un datum de projection sur un ellipsoïde donné qui n'est pas forcément le même dans l'instrument de mesure (WGS84, srid 4326) et/ou et le format de géolocalisation géographique que nous souhaitons utilisé (RFG93 ou Lambert93 dans notre cas ou srid 2154), ceci appelle également une transformation que l'on doit appliquer tant aux données du LIDAR qu'à celles recues des relevés G.P.S. Nous rappelons cette transformation, pour mémoire :

Listing 1 – C++ code using listings

```

1
2     char *srid2154 = "+proj=lcc +lat_1=49 +lat_2=44 +lat_0=46.5 +lon_0=3" ;
3     srid2154 +=x_0=700000 +y_0=6600000 +ellps=GRS80 +towgs84=0,0,0,0,0,0";
4     srid2154 +=+units=m +no_defs";
5     char *srid4326 = "+proj=longlat +ellps=WGS84 +datum=WGS84 +no_defs";
6     projPJ target = pj_init_plus(srid2154);
7     projPJ source = pj_init_plus(srid4326);
8
9     if(source==NULL || target==NULL)
10        return false;

```

2. concernant le référentiel géométrique dans lequel nous travaillons, les mesures LIDAR sont conduites dans le référentiel 3D propre de l'instrument de mesure par rapport à sa propre origine, les données géolocalisées du terrain, fournies par G.P.S sont également fournies dans un référentiel 3D, qui est le même, mais offre l'avantage d'être bien calé et correctement orienté. Par la transformation à venir, il nous appartient de faire coïncider par une opération de translation rotation les deux référentiels.

Le recalage s'effectue en identifiant des similarités dans les nuages sources (les points homologues) et dans le nuage cible (les amers mesurés au sol). Concernant les amers mesurés qui vont nous servir à recaler le nuage de mesures (nuage source) dans le référentiel géographique souhaité, nous travaillons sur la base de triangles (3 points : assurance d'une surface non gauche). Le principe est de recaler le nuage de mesure, le nuage source, dans le référentiel géographique que nous voulons exploiter ou nuage cible. Donc le nuage cible rassemble les relevés G.P.S effectués sur le terrain (Amers), tandis que le nuage source est fourni par l'instrument de mesures LIDAR et contient a priori les points homologues aux amers précédents et aisément identifiables. En final, nous nous retrouvons avec deux couples de vecteurs (3 points) l'un dans le nuage source (les homologues) et l'autre dans le nuage cible (les amers) que nous devons forcément superposer au mieux.

11.2 Sélection des points de mesure G.P.S satisfaisants

Or nous avons effectué divers relevés au sol. Cependant des précautions préalables sont à prendre, par rapport aux relevés G.P.S. Etant dans le registre de la mesure, il nous faut écarter les valeurs aberrantes de ces couples (amers / points homologues). Nous allons y procéder en deux étapes. Préalablement rappelons quelques règles de base :

1. une ligne nécessite la connaissance de 2 points, avec N points relevés sur le terrain, nous sommes capables de construire $(N-1)!$ vecteurs,
2. la construction d'un triangle nécessite deux vecteurs avec un point d'ancrage commun, partant de chaque point relevé par G.P.S sur le terrain, il nous est possible de construire $(N-1)$ triangles avec le même point d'ancrage, sachant que nous avons N points ceci offre la possibilité de $N*(N-1)$ triangles (couple de vecteurs ayant le même point d'ancrage)
3. cependant tous ces triangles n'ont pas la même validité pour le calcul d'une matrice de transformation qui soit fiable, donc il nous faut assurer une sélection parmi ceux-ci.

En terme d'évaluation et calcul de l'opérateur de transformation un seul couple de triangles suffit, le premier issu de 3 amers du nuage cible, associé au triangle construit dans le nuage source avec les points homologues des trois amers précédents. Encore faut-il que les triangles, de ce couple, soient aussi similaires que possible, afin de respecter l'identité et la conservation, au mieux, des longueurs et des angles lors de la transformation. Le calage et la superposition des deux triangles nécessitent deux rotations et une translation, dont nous avons à calculer les matrices (4×4) en coordonnées homogènes correspondantes. L'élection de plusieurs triangles permettrait de contrôler quelque peu a priori, la validation des matrices obtenues, mais les critères d'identité et de similarité sont primordiaux. Avant le calcul des matrices de transformation, pour la validation des triangles, nous allons nous appuyer sur **deux critères de mesures**, sur chaque triangle, afin de sélectionner le couple optimum :

- minimiser l'écart du calcul de longueur du module de chaque vecteur semblable pris deux à deux (source et cible),
- minimiser l'écart du calcul de l'angle au point d'ancrage entre un triangle de la cible et son homologue dans le nuage source.

La précision des calculs est également liée aux tailles relatives des modules des vecteurs (retenir un ratio > 0.7) et à celle de l'angle au sommet (privilégier 45°). Pour mémoire, la minimisation de l'écart de l'aire des surfaces des triangles, pris deux à deux, est conséquente des deux vérifications précédentes. Comme indiqué dans le § 4, nous prenons la précaution de relever plusieurs points sur le terrain, afin de disposer d'un choix optimum pour l'évaluation des matrices propres à l'opérateur de transformation.

11.3 L'origine possible de l'erreur et sa quantification

11.3.1 Les sources d'erreurs

Comme nous venons de le présenter, on constate que les risques d'erreurs sont constamment présents. Dans le paragraphe précédent, nous mettons en cause, les anomalies de mesure lors des relevés des points d'amers G.P.S sur le terrain, ce qui confirme encore la nécessité d'un maximum de précautions à prendre dans cette phase. Mais ce n'est pas la seule source d'erreurs nous y ajouterons :

1. les erreurs de rétroprojection, lors du passage d'un ellipsoïde à un autre notamment lorsque les modes de projection sont différents, ce qui a un impact sur la conservation des attributs géométriques (longueur, angle, aire de surface) les règles de conservation changent selon que la projection soit conique, azimuthale ou cylindrique, a priori ceci est intégré dans les logiciels de transformation. Ces points sont à approfondir concernant les tolérances de la chaîne de mesure, ce qui n'est pas fait dans la présente note,
2. les problèmes de calibrage de la chaîne : *instrument de mesure + logiciels de traitement des données inertielles et de distance (temps de vol)*, car dans le cas présent, les données sont fournies par une centrale inertielle. Par contre dans ce second cas, il nous est tout à fait possible de le calibrer, comme nous l'indiquons ci-après, même si ces opérations ne furent pas conduites initialement, mais sera à conduire dans l'avenir afin de qualifier les procédures de mesures.

Le principe de calibrage que nous proposons permet d'évaluer l'erreur quadratique liée :

1. à la non conservation des angles au niveau du point d'ancrage (point commun du couple de vecteur),
2. à la non conservation des longueurs.

Nous nous intéresserons au premier, car c'est le problème essentiel que nous rencontrons avec nos relevés d'amer, le second aspect se traite d'une manière similaire nous ne le développerons pas ici.

11.3.2 Proposition de correction post-mesure

Compte de l'absence de méthodologie initiale dans les relevés de mesures LIDAR, en sous bois, dont nous disposons, nous avons conduit des relevés G.P.S. ex post sur le terrain. Nous renversons la méthode, c'est à dire, que nous avons identifié dans le nuage de points des éléments singuliers dont nous avons relevé, après coup, la position sur le terrain. Nous constatons sur les 20 points relevés qu'il y a :

- une préservation raisonnable de la longueur, l'écart entre le nuage de points et les relevés au sol sont dans une moyenne de 0.7%,
- par contre, concernant l'angle du point d'ancrage il peut varier dans une grande proportion, de 0 à 75%.

En conséquence dans le cas présent, compte tenu de l'historique des relevés, nous proposons une correction adhoc permettant un dépouillement équilibré des données. Mais dans le futur, toute économie de calibrage est à écarter, la méthode de correction que nous proposons ici n'est que la la contraposée de ce qui **doit-être** fait pour le calibrage préalable dont le détail sera donné dans les travaux à venir, mais qui sera similaire et inversé par rapport à ce que nous présentons ici. La proposition de calibrage et sa contraposée disent :

- si les points homologues du nuage de points sont calés sur les amers relevés sur le terrain alors l'instrument est calibré, dans le cas contraire on corrige l'instrument lidar ou ses données de mesures,
- si les points homologues du nuage de points ne sont pas calés sur les amers relevés sur le terrain alors le relevé G.P.S. est faux et on corrige ce dernier ou ses mesures, dans le cas contraire on estime la chaîne de mesure calibrée.

Toute proportion gardée et le talent en moins, nous serions dans le syndrome possible de l'erreur de Michel-Ange. Aurait-il fait une erreur en sculptant le nez de la statue de David. Que devrait-il faire ? Corriger le nez de la statue au risque de l'altérer ou alors celui du modèle ? Cette boutade pour rappeler la dimension fondamentale des méthodologies de mesure et de calibrage.

Vu notre historique, nous sommes dans le second cas des propositions de calibrage, nous procédons comme suit.

Parmi nos relevés sur le terrain, nous prendrons celle ou l'erreur d'angle au point d'ancrage est la plus faible, nous la désignerons par θ_ϵ . Soit A le point d'ancrage, B et C les autres points dont les relevés G.P.S. ont été effectués sur le terrain. Nous avons donc le triptyque :

- le vecteur \vec{AB} ,
- le vecteur \vec{AC} ,
- l'angle θ , au point d'ancrage A, sur lequel nous considérons avoir une erreur θ_ϵ .

En conséquence, cette correction s'effectue autour de la normale \vec{N} aux deux vecteurs précédents $\vec{N} = \vec{AB} \otimes \vec{AC}$, dont nous devons caculer la matrice de rotation ancrée en A autour du vecteur unitaire \vec{N} d'un angle θ_ϵ . A priori, nous appliquons cette rotation sur le vecteur le plus entaché d'erreur selon notre appréciation. Supposons que ce soit l'extrémité C qui passera à la position C_c ,

Ceci donnera donc le nouveau triptyque :

- le vecteur \vec{AB} ,
- le vecteur \vec{AC}_c ,
- le point d'ancrage A.

qui sera ensuite utilisé pour l'évaluation de l'opérateur de transformation, calcul que nous voyons dans le paragraphe qui suit.

11.4 Calcul des matrices de rotation et transformation

Pour mémoire, deux matrices de rotation sont à calculer autour de deux vecteur unitaires à choisir. Pour les deux, comme on le verra, le point d'ancrage est commun, si le premier vecteur de rotation est la normale au premier couple (source/cible) similaire, le second vecteur de rotation devient la superposition de ces deux vecteurs une fois normalisée, mais le plan et l'angle de rotation sont à calculer.

Le choix des couples de vecteurs (amers et homologues) ont été effectués en respect des critères précédents. La figure 21 présente les nuages source (Ns) et cible (Nc) avec les couples de vecteurs similaires, respectivement $[\vec{V}_{1s}, \vec{V}_{2s}]$ ancrés en As et $[\vec{V}_{1c}, \vec{V}_{2c}]$ ancrés en Ac. La procédure de calcul, respecte les étapes suivantes :

1. Translater l'ancrage cible Ac sur l'ancrage source As T_{as} et le tout sur le zéro $[0, 0, 0]$ du référentiel, T_{s0} vecteur de translation, qui devient l'ancrage des rotations (origine des vecteurs sources et cibles), pour évaluer les matrices de rotation.
2. l'axe de la 1ère rotation est la normale unitaire $\vec{N} = \vec{V}_{1s} \otimes \vec{V}_{1t}$, l'angle de rotation étant l'angle entre ces deux vecteurs, ceci donne la matrice [M1] qui assure la superposition de \vec{V}_{1s} sur \vec{V}_{1c}
3. le second axe de rotation devient \vec{V}_{1c} ,
4. on calcule la transformation de l'extrémité \vec{V}_{2s} tel que $\vec{V}_{2sT} = [\text{M1}] * \vec{V}_{2s}$,
5. la seconde matrice de rotation est obtenue en superposant \vec{V}_{2sT} avec \vec{V}_{2c} , l'angle de rotation étant celui séparant leurs projections orthogonales sur l'axe de rotation \vec{V}_{1c} en h (cf. figure : 21), ceci nous permet d'obtenir la matrice [M2].
6. la matrice globale de transformation $[\text{M}] = [\text{M2} * \text{M1}]$,
7. En final la transformation des points source vers les points cible est définie par l'expression suivante : $[\text{PointCible}] = [\text{M}] * [\text{PointSource} - T_{s0}] - T_{as}$

12 Mise des données attributaires dans le référentiel de travail

Dans le paragraphe 10.3, nous aboutissions à la liste des arbres identifiés avec leurs attributs (géolocalisation dans le référentiel RFG93 [PointSource] et

le diamètre équivalent de leur section). Leur position dans le référentiel final est donnée par l'expression évaluée précédemment.

$$[PointCible] = [M] * [PointSource - \vec{T}_{s0}] - \vec{T}_{as}$$

Ce résultat final, donné sous forme d'un fichier C.S.V. permet de transférer vos données dans le S.I.G. de votre choix.

13 Précautions géométriques complémentaires

Comme nous l'avons vu précédemment l'extraction des données de position et de diamètre se fait à partir d'une image, donc une information en 2D. Cette image est le fruit de l'orthoprojection d'une tranche de nuage (parallépipède d'une certaine épaisseur dZ) sur le plan horizontal, suite à la mise à plat du relief par le retrait de la M.N.T . Pour la construction de cette image, nous définissons, ses bornes [inf., sup.] ;

— sur l'axe de X ou longitude [Xmin, Xmax],

— sur l'axe des Y ou latitude [Ymin, Ymax],

il faut avoir présent à l'esprit que selon la hauteur Z du sectionnement dZ , du fait que l'on collecte des points dans un nuage 3D, les **bornes précédentes** peuvent **varier**, mais il y a conservation des distances et des angles lors de la projection. En conséquence, pour pouvoir utiliser en permanence le même opérateur de transformation précédent, si on travaille sur des images issues de sectionnements effectuée à des altitudes Z différentes des correctifs de translation s'imposent. Mais ceci se fait aisément par l'opération linéaire suivante qui transpose les coordonnées de nos points images (résultats du filtrage et du pivot d'accumulation) dans le référentiel d'affichage de **CloudCompare** qui est notre instrument de mesure sur le nuage de points initial (nuage source). Les transformations linéaires à mettre en oeuvre sont les suivantes :

$$— X_{nuage} = X_{min} + X_{image}$$

$$— Y_{Nuage} = Y_{max} - Y_{image}$$

où en respect des structures de référence des coordonnées image et nuage de points :

1. X_{min} est l'abscisse minimale du nuage de points source,
2. Y_{max} est l'ordonnée maximale du nuage de points source,
3. X_{image}, Y_{image} sont les coordonnées d'un point de l'image à trouver dans le nuage source,
4. X_{nuage}, Y_{nuage} sont les coordonnées obtenues dans le nuage de points initial (source) et sur lesquelles sera appliqué l'opérateur de transformation pour les placer dans le référentiel final.

14 Présentation des résultats finaux

14.1 Geolocalisation



FIGURE 22 – Vue de dessus du nuage

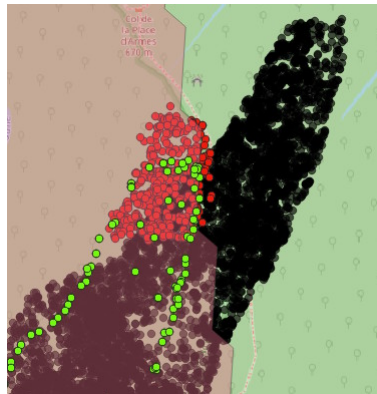


FIGURE 23 – Résultats dans Qgis

Ci-dessus, le résultat de l'analyse d'une zone de l'ordre de 1.5 ha, rassemblant environ 420 arbres dont les diamètres varient de 20 cm à 120 cm. Sur la première image (figure : 22) nous avons une vue de dessus d'une section (10 cm d'épaisseur) de nuage de points à 65 cm du sol. C'est une image bruitée, les petits cercles sont des sections d'arbres. Les trois lignes sont des profils de la clôture qui délimite la zone nord protégée de la réserve de la Massane.

Le relevé LIDAR intègre des informations internes et externes à la clôture. Sur la seconde image ci-dessus (figure 23) on retrouve la même zone reprise dans le système d'information géographique QGIS. Le pourtour de la clôture (relevé G.P.S) est indiqué par les pointillés verts. Les points rouges (issus de nos

opérations d'extraction) indiquent les arbres au sol qui se trouvent bien dans la zone attendue de part et d'autre de la clôture, comme indiqué sur la figure précédente. Ceci valide, le principe de la chaîne de transformation, permettant d'extraire d'un nuage de point les informations relatives à la géolocalisation des arbres et leur diamètre de manière automatique. Le nuage de points initial n'ayant pas fait l'objet de règles particulières de collectes, on parvient néanmoins à restituer avec une certaine précision la géolocalisation des arbres ainsi que leurs diamètres. Les résultats de nos calculs sont donnés, pour exemple, dans la table attributaire ci-dessous.

	NumArbre	Longitude-X	Latitude-Y	Altitude-Z	Cloud-X	Cloud-Y	Cloud-Z	img-X	img-Y	Sid
1	237	702668,03...	6154747,4...	672,523	-53,41	-25,280001	-5,29004	5317	10251	-5350:-2550
2	238	702647,04...	6154733,5...	671,544222	-78,230003	-25,780001	-9,37267	2835	10301	-7850:-2000
3	231	702651,38...	6154746,0...	669,04496	-67,849998	-17,23	-9,49162	3873	9446	-6800:-1750
4	232	702657,16...	6154749,1...	669,86706	-61,43	-17,73	-7,94258	4515	9496	-6150:-1800
5	233	702642,19...	6154738,2...	669,202871	-79,699997	-19,02	-11,0155	2688	9625	-8000:-1950
6	234	702653,28...	6154744,9...	669,775413	-66,870003	-19,219999	-8,89953	3971	9645	-6700:-1950
7	227	702649,83...	6154762,0...	664,409086	-60,41	-2,31	-11,277	4617	7954	-6050:-250
8	228	702647,83...	6154757,3...	665,2821	-64,660004	-5,38	-11,3227	4192	8261	-6500:-550
9	229	702655,34...	6154759,7...	666,292159	-57,150002	-7,42	-9,65863	4943	8465	-5750:-750
10	230	702643,08...	6154741,5...	668,798374	-77,199997	-16,639999	-10,8	2938	9387	-7750:-1700
11	223	702698,48...	6154795,6...	667,74422	-2,27	-0,07	-0,509254	10431	7730	-250:-50
12	224	702699,45...	6154795,8...	667,942916	-1,33	-0,38	-0,234915	10525	7761	-150:-50
13	225	702654,97...	6154765,9...	664,693138	-54,099998	-1,8	-10,1514	5248	7903	-5450:-200
14	226	702626,63...	6154747,7...	663,196762	-87,370003	-2,08	-15,7585	1921	7931	-8750:-250
15	219	702649,17...	6154767,6...	663,33517	-57,990002	2,87	-11,3723	4859	7436	-5800:1250
16	220	702626,78...	6154752,2...	662,015477	-84,769997	1,83	-16,1131	2161	7540	-8500:150

FIGURE 24 – Données attributaires calculées par l'applicatif de traitement

Dans la table attributaire ci-dessus on reconnaît pour chaque arbre :

- son identifiant,
- sa géolocalisation RFG93 sur site forestier, issue de la transformation après extraction,
- sa position dans le nuage de points de mesures (Cloud-X-Y-Z),
- sa position (X,Y) dans l'image de projection au sol,
- l'index sid permettant d'extraire l'altitude (Cloud-Z) de la base de donnée M.N.T de la zone, calculée par l'application et ensuite transformée en Altitude-Z.

L'analyse approfondie des résultats, valide nos objectifs initiaux, présentés dans notre résumé d'introduction à l'exception des temps de calcul qui restent le double de ceux ciblés faute d'un travail, de parallélisation des calculs, suffisant de notre part. Les travaux ultérieurs traiteront ce problème.

14.2 Appréciation statistique des résultats

Sur la base des résultats obtenus où nous présumons de la possibilité d'erreur du fait des imprécisions de nos relevés G.P.S, il est quand même possible de

conduire une évaluation statistique de la validité de nos résultats. À cette fin nous conduisons le calcul suivant :

- nous prenons dans l'ordre, deux à deux, les points successifs de géolocalisation fournis par notre algorithme,
- nous effectuons le calcul de distance entre ces deux points au sol (RFG93 en mètre) et sur l'image projetée (1px = 1 cm), ce sont des segments homologues,
- a priori ces distances devraient être identiques, nous en faisons la différence pour avoir l'erreur absolue,
- pour normaliser l'appréciation, nous faisons le calcul relatif de l'erreur (en millième).

Le calcul est conduit sur 452 segments, le tableau ci-dessous fournit les statistiques des erreurs relatives que nous avons évaluées sur les calculs comparatifs :
 - distance RFG93, - distance image projetée.

STATISTIQUE D'ERREUR RELATIVE (Millième)	
Moyenne	18,5854649490152
Erreur type	1,20288485374828
Médiane	15,4632424477124
Premier quartile	12,2218694914485
Troisième quartile	18,8934024456935
Variance	654,013251062417
Écart type	25,5736827825485
Kurtosis	227,578750683225
Asymétrie	13,3514336574673
Plage	474,871302876365
Minimum	0,000579121928813
Maximum	474,871881998294
Somme	8400,63015695489
Nombre de points	452

FIGURE 25 – Statistique sur les erreurs relatives de calcul de géolocalisation

Une analyse rapide des statistiques d'erreurs donne :

- l'erreur relative moyenne est inférieure à 2%,
- la moitié des erreurs est inférieure à 1,25%,
- le troisième quartile commence à des erreurs > 2%.

Il y a quelques points aberrants, mais dans l'ensemble la précision de mesure relative respecte nos objectifs. Bien entendu, une validation complémentaire sur le terrain conclura cette appréciation.

15 Résultats de mesures et calibration, une méthode de travail à arrêter

15.1 Constat

Bien que ne bénéficiant pas de calibration de la chaîne de mesures nous avons considéré que les données (position dans le référentiel de l'instrument de mesure, et distances entre points) présentées dans le visualiseur CloudCompare étaient correctes. Concernant les relevés G.P.S. au sol, même avec des moyens restreints, nous avons pris des précautions suffisantes de mesures (attente du calage G.P.S et comparaison entre 3 instruments), pour relever les 7 ou 8 points points d'amers corrects dont 3 pour calculer l'**opérateur de transformation**. En outre, deux opérations post-mesures :

- un tri de validation (cf. § 11.2),
 - une correction sur les angles de couples de vecteurs (cible) (cf. § 11.3.2),
- nous ont permis de travailler sur deux triangles (source et cible) strictement semblables (longueur en mètres et angle en radians identiques dans une tolérance de 10^{-4}). Au total nous avons relevé une vingtaine de points d'amer, nous en avons retenu les plus vraisemblables, au vu de nos moyens de mesures.

Comme indiqué au §11.2 nous avons analysé la validité des points relevés par le contrôle de la conservation des distances (en mètre) et des angles (en radians) avec une tolérance de 10^{-4} . Ceci confirme quelques points, ceux qui furent relevés avec le plus de précautions. Donc, avec nos 20 points relevés, nous avons construits 190 segments. Pour 41 d'entre eux à +/- 2 m (au maximum) nous avons les mêmes longueurs :

- dans le nuage source,
- dans le nuage de points transformé par l'opérateur calculé,
- dans les mesures au sol.

Donc pour les 190 segments leurs longueurs sont évaluées dans le nuage source et le nuage issu de l'opérateur de transformation. Ceci permet également d'évaluer la validité de notre opérateur de transformation calculé. Pour les 41 précédents (dans les mesures au sol), 14 segments sont dans la tolérance absolu 10^{-2} m, les autres à +/- 2 m au plus (+/- 2% en erreur relative). Pour le reste, 139 segments, nous les considérons comme des associations avec au moins un points aberrant issu de nos mesures G.P.S. au sol avec des moyens insuffisants.

Au dépouillement, nous obtenons sans surprise, les extractions de positionnement d'arbre, en strict respect du nuage de point. Il apparaît clairement dans nos travaux, une imprécision sur les **positionnements géographiques absolus**, des amers (moyens insuffisants), nos objectifs ciblés en terme :

- de géolocalisation absolue sont à améliorer,
- de mesure de distance nous respectons celles du nuage de point,
- de valeur d'angles inter segments (position relative des arbres) nous respectons le nuage de points.

Si le nuage de points est représentatif de la réalité, notre approche est bonne.

Donc l'insuffisance qui subsiste nous le mettons au strict compte de notre méthode de relevés d'amers qui est parfaitement perfectible. En tout état de cause, les amers aberrants ne sont pas utilisés. Nous obtenons des résultats qui reflètent un profil de la réalité de terrain, l'approche adoptée semble intéressante et prometteuse, car elle nous laisse voir la possibilité d'atteindre totalement ce que nous ciblons.

Mais nous nous heurtons à des écueils de méthode et de calibrage qu'il nous faut devoir préparer à lever dès maintenant, en posant clairement une **obligation de méthode de mesure et de calibration** :

1. en premier lieu, l'absence, de protocole de mesure et de calibration des instruments, obère fortement la fiabilité des données collectées, mais il faut porter au crédit de ceux qui ont conduit ces mesures d'avoir su fournir des données qui permettent à ce jour d'étayer de nombreux points de réflexions, objets de la présente note (**Pas de données : pas de réflexions vérifiables !**),
2. en second lieu, la perspective de l'attractivité économique d'une telle méthode de mesure, nous a également conduit à un certain simplisme négligeant (notamment les relevés au sol effectués par l'auteur) du fait de la faible précision de la méthode employée, nous avons travaillé à l'économie, mais ceci est aisément perfectible au moyen d'instruments plus performants sans vraiment obérer les coûts,

Concernant le problème de méthodes de mesures et de calibration il nous faut savoir les définir, les mettre en oeuvre et les qualifier. Nous en donnons quelques pistes ci-après. Elles seront reprises dans les travaux ultérieurs.

15.2 Les éléments source d'erreur dans la chaîne de mesures et de traitements

La base de la fiabilité de relevés de mesures repose sur la bonne calibration de la chaîne de mesure et des traitements associés. Dans le cas présent, cela comprend les éléments suivants qui ont été utilisés pour :

1. collecter les données (accélérométrie, gyrométrie, angle d'Euler du tir laser, temps de vol) => le **LIDAR GEOSLAM ZEB-REVO**, ceci relève du constructeur dans les performances annoncées dans ses spécifications,
2. conditionner les données précédentes => **logiciel GEOSLAM** également fourni par le constructeur, afin d'élaborer le fichier de fourniture des données dans un format standard ***.las** et fidèle aux données collectées, ceci relève également du constructeur de l'instrument de mesure toujours en respect des performances annoncées dans ses spécifications,
3. relever les coordonnées géographiques **G.P.S. (WGS 84)** au sol, afin de les associer à des points singuliers du nuage de points précédent => G.P.S Garmin Etrex (clairement nous sommes ici dans une situation de précision insuffisante), un relevé différentiel s'impose, comme l'emploi de la télémétrie laser,

4. visualiser le nuage de points, utilisé notamment pour des mesures de distance dans un référentiel donné et des relevés de localisation de points (x (longitude), y (latitude), Z (hauteur)). et les distances entre points dans un référentiel Euclidien => **CLOUDCOMPARE**,
5. assurer les transformations géométriques issues des algorithmes des présents travaux.

15.3 Les calibrages possibles (fréquence annuelle)

Reprenons un à un les points précédents, en fusionnant les deux premiers pour parler de chaîne GEOSLAM :

- pour la chaîne **GEOSLAM** nous proposons de conduire deux types de calibration :
 1. **une calibration statique** en point fixe, le lidar sur trépied émet en direction de réflecteurs LIDAR (géolocalisés) disposés à des distances et hauteurs distinctes, dans une distance maximale de 35 m. Un relevé de 20 mn, sachant que chaque tir lidar est daté permet d'apprécier la dérive éventuelle de la centrale inertielle sur l'ensemble de la chaîne de mesures,
 2. **une calibration dynamique**, des réflecteurs LIDAR (géolocalisés) sont disposés sur une surface de 2500 m²(50m × 50m) ou plus à valider, le lidar se promène dans la zone et on vérifie la validité des mesures distances entre points tout comme le respect (calcul initial et mesures) des angles au sommet des triangles reconstitués entre les différents points.
- pour **CLOUDCOMPARE** , on y relève la localisation de deux points comme leur distance, la cohérence de ces deux données est aisément vérifiable : deux points donnent une ligne, le calcul de la distance Euclidienne est immédiate,
- **pour les relevés de points d'amer au sol**, nous utiliserons d'autres équipements, télémètres laser pour la distance entre points et G.P.S différentiel pour localiser les points d'amer, ces deux mesures pouvant se qualifier réciproquement.
- les points d'amer étant relevés, nous devons nous assurer de la cohérence des distances entre ces amers et leurs homologues dans le nuage de mesures et corriger si nécessaire, sans oublier le contrôle de l'identité des angles homologues dans les constructions par trio de points semblables, nous l'avons fait dans la présente étude, mais faute d'élément de calibration, l'usage n'est pas probant.
- concernant les opérateurs de transformation de la présente étude, leur validité a été testée par des opérations de translations/rotation entre triangles semblables répartis dans l'espace 3D et leur superposition se fait avec une précision de 10⁻⁵ sur le mètre (triangle de 1000m² environ et placés à des distances de 700 Km dans le référentiel).

16 A propos de la bibliographie

Les présents travaux sont une suite logique des apprentissages cités en 1.1, (7) et des recherches bibliographiques citées dans (6), ils n'ont pas fait l'objet de recherches bibliographiques complémentaires pour être conduits. La réflexion antérieure a dicté leur construction. Par contre, en 2019/2020 un nouvel état de l'art s'impose notamment pour les travaux ultérieurs et pour mieux positionner le réalisé, afin de bien identifier quels doivent être nos axes de progrès, dans nos travaux à venir (Paragraphe 17).

Des références bibliographiques complémentaires, non référencées dans le présent article, sont données pour mémoire.

On s'intéressera notamment à la bibliographie citée dans (15) tout comme aux travaux de l'Université de Sherbrooke au Canada dans la Province du Québec dans (16).

17 Perspectives et travaux ultérieurs

En matière d'algorithmique et de traitement toutes les étapes sont parcourues, depuis le nuage brut de départ jusqu'à l'extraction de l'arbre géolocalisé avec ces attributs pour mise en base de données S.I.G. Les travaux antérieurs, notamment pour l'apprentissage automatique qui n'est pas abordé ici, concernant la détection et la classification des formes au sol comme des cavités et parasites sur arbre (champignons), seront repris et complétés. Tous les modules élémentaires spécialisés sont ré-écrits en C++ , voire en C_CUDA La robustesse de l'ensemble est à vérifier, en plus grand détail, avec des retours terrains. L'intégration globale est à faire avec PyQGIS qui peut aisément appeler tous ces modules avec un interface plus convivial, ce qui est encore beaucoup de travail, mais a priori sans grandes surprises. Dans cette perspective, outre l'hypothèse PyQGIS, des cahiers des charges sont à envisager pour des choix de développement industriel :

- greffon QGIS avec PyQgis,
- Logiciel dédié réalisé sous Qt (Pb de licence),
- logiciel spécialisé réalisé sous GTK (Licence libre),
- service en ligne sous serveur distant, ce dernier aspect a fait l'objet de beaucoup d'investigations, non abordées dans l'article, qui mettaient en avant les problèmes de compatibilité durable des bibliothèques, la mise en oeuvre en conteneur (Docker), et le rapatriement en local de visualisation 3D.

En matière technologique. Les travaux d'intégration et de parallélisation (Cuda et OpenMp) des exécutables, restent de très bons sujets pour des alternants ou des stagiaires ingénieurs ou M2, sans oublier des algorithmes d'accélération à enrichir.

18 Conclusions

L'opérateur de transformation étant défini, nous arrivons à minimiser la quantité de calculs car nous appliquons cet opérateur de transformation aux seuls points de localisation des arbres dans la zone (quelques centaines) contre l'ensemble des points du nuage (quelques dizaines de millions par ha).

Comme cela est indiqué les images traitées sont normalisées (la position du pixel est linéairement liée à la géolocalisation RFG93) :

1. Un point de position retrouve sa position [X,Y] dans le nuage de points (référentiel lidar), auquel est appliqué l'opérateur de transformation.
2. La position Z du terrain, à la position [X,Y], est retrouvée dans la cellule correspondante du MNT.
3. L'opérateur de transformation recalcule par rotations et translations l'ensemble des points de localisation d'arbre du fichier source dans le référentiel RFG93.
4. La transformation (rotations et translation) est effectuée en une seule opération, avec une précision suffisante.
5. Les données de l'arbre, ses attributs en final, sont donnés dans un format permettant la mise en base de données PostGis/Postgres ou SpatiaLite, ou tout type de S.I.G..

L'essentiel des applicatifs est développé en C++ sous forme de modules de commande en ligne. Certains filtres sont écrits en C_CUDA et la parallélisation possible des tâches sera complétée. Les traitements les plus lourds sont :

1. La génération du MNT,
2. Le filtrage des coupes tomographiques horizontales avec l'extraction des positions des positions d'arbres par diamètre.

En l'état actuel des développements, le processus complet aboutissant à l'extraction des positions d'arbres pour l'ensemble des filtres de diamètre (11 au total) demande environ 90 minutes par ha en moyenne, sans parallélisation aucune. Le processus part du fichier brut *.las issu du relevé, jusqu'à la génération de la couche attributaire QGIS des arbres avec pour chacun (identité, géoloc. RFG93, diamètre section à une hauteur donnée), et la requête SQL de mise en base de données géométrique de ces informations. L'industrialisation, intégrera ces traitements et proposera un enchaînement des tâches de manière plus conviviale et s'appuiera sur PyQGIS pour l'interface homme/machine notamment pour une intégration directe dans QGIS. En outre, l'hypothèse d'applicatifs spécialisés sous interface Qt ou GTK offriront des ouvertures vers d'autres S.I.G.

Références

- [1] Jean-André MAGDALOU, Joseph GARRIGUE (2002)
Travaux 55 : Suivi forestier et cartographie assistée par système d'information géographique
Association des amis de la Massane, Laboratoire Arago - 66650 - BANYULS-SUR-MER
- [2] Jean-André MAGDALOU, Christophe HURSON et Joseph GARRIGUE (2002)
Travaux 62 : Suivi ripisylve et cartographie assistée par système d'information géographique
Association des amis de la Massane, Laboratoire Arago - 66650 - BANYULS-SUR-MER
- [3] Jean-André MAGDALOU, Christophe HURSON et Joseph GARRIGUE (2005)
Travaux 72 : Etude des effets de la conjonction sécheresse/canicule de 2003 sur la forêt de la Massane et cartographie assistée par système d'information géographique
Association des amis de la Massane, Laboratoire Arago - 66650 - BANYULS-SUR-MER
- [4] Jean-André MAGDALOU*, Christophe HURSON** et Joseph GARRIGUE (2009)
Travaux 80 : Dynamique du bois mort et impact des crues sur quelques espèces riveraines d'un petit fleuve côtier méditerranéen « La Massane »
Association des amis de la Massane, Laboratoire Arago - 66650 - BANYULS-SUR-MER
* Réserve Naturelle Nationale de la Forêt de la Massane (massane.rn@wanadoo.fr) ** Fédération des Réserves Naturelles Catalanes (christophe.hurson@espaces-naturels.fr)
- [5] Stéphane PIGNON (2016)
Forêt de la Massane, relevé LIDAR, rapport technique.
Sintégra 11 Chemin des Prés F-38241 Meylan
- [6] Mahdi SMIDA (2018)
Agrégation, Déformation et irrégularités Manipulation de nuages de points LIDAR.
UPVD, Mémoire Master II, 2018.
- [7] Yasser BOUTALEB (2018)
Traitements de nuage de points appliqués en arboriculture et foresterie.
UPVD, Mémoire Master I, 2018.
- [8] H.K. Yuen, J. Princen, J. Illingworth and J. Kittler (1989)
A comparative study of hough transform methods for circle finding

Department of Electronics and Electrical Engineering University of Surrey,
Guildford, GU2 5XH. U.K.

- [9] Güray ERUS (2008)
Reconnaissance d'objets cartographiques dans les images satellitaires à haute résolution
Université PARIS DESCARTES Centre universitaire des Saints-Pères UFR
DE MATHÉMATIQUES ET INFORMATIQUE
- [10] Monica Herrero-Huerta¹, Roderik Lindenbergh, Pablo Rodriguez-Gonzalvez (2018)
Automatic tree parameter extraction by a Mobile LiDAR System in an urban context
1. TIDOP Research Group, Higher Polytechnic School of Avila, University of Salamanca, Avila, Spain,
 2. Department of Geoscience and Remote Sensing, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands,
 3. Department of Agronomy, Purdue University, West-Lafayette, Indiana, United States of America,
 4. Department of Mining Technology, Topography and Structures, Universidad de León, Ponferrada, Spa
- [11] Anne Bienert, Hans-Gerd Maas (2009)
METHODS FOR THE AUTOMATIC GEOMETRIC REGISTRATION OF TERRESTRIAL LASER SCANNER POINT CLOUDS IN FOREST STANDS
Dresden University of Technology, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, 01062 Dresden, Germany anne.bienert@tu-dresden.de
- [12] Bisheng Yang ^{1,2,*}, Wenxia Dai ^{1,*}, Zhen Dong ¹ and Yang Liu ¹ (2016)
Automatic Forest Mapping at Individual Tree Levels from Terrestrial Laser Scanning Point Clouds with a Hierarchical Minimum Cut Method
¹ State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China; dongzhenwhu@whu.edu.cn (Z.D.); lyang@whu.edu.cn (Y.L.) ² Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan University, Wuhan 430079, China * Correspondence : bshyang@whu.edu.cn (B.Y.); daiwenxia@whu.edu.cn (W.D.); Tel. : +86-139-8609-9632 (B.Y.); +86-187-7106-1723 (W.D.)
Remote sensing MDPI Academic Editors : Nicolas Baghdadi, Lars T. Wasser, Josef Kellndorfer and Prasad S. Thenkabail Received : 4 January 2016; Accepted : 25 April 2016; Published : 3 May 2016
- [13] Anne Bienert ^{1,*}, Louis Georgi ², Matthias Kunz ² [OrcID] , Hans-Gerd Maas ¹ [OrcID] and Goddert Von Oheimb ² [OrcID] (2018)
Comparison and Combination of Mobile and Terrestrial Laser Scanning for

Natural Forest Inventories

Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Technische Universität
Dresden, D-01062 Dresden, Germany

Institute of General Ecology and Environmental Protection, Technische
Universität Dresden, D-01735 Tharandt, Germany

- [14] OGC Community Standard (2018)
LAS Specification 1.4
Copyright notice Copyright © 2018 Open Geospatial Consortium
<http://www.opengeospatial.org/legal/>.

- [15] *2-year Post-doctoral Offer Multi-layer reconstruction of 3D point clouds :
Application to forest 3D structure and biodiversity metrics extraction using
airborne LiDAR and multispectral images Workplace*
IGN - Lab LaSTIG - Team ACTE73 avenue de Paris 94165 Saint Mandé
<https://tinyurl.com/postdoc-lidar>

- [16] Richard Fournier (2019)
*Voir travaux et références bibliographiques du département de géomatique
appliquée*
Département de géomatique appliquée Faculté des lettres et sciences hu-
maines 2500, boulevard de l'Université Sherbrooke (Québec) J1K 2R1
<https://tinyurl.com/uozy4ct>