



**HAL**  
open science

# Détection des câbles et pylônes électriques avec un drone équipé d'un capteur Lidar

Quentin Maouche

► **To cite this version:**

Quentin Maouche. Détection des câbles et pylônes électriques avec un drone équipé d'un capteur Lidar. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2021. dumas-03563227

**HAL Id: dumas-03563227**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03563227v1>**

Submitted on 1 Apr 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS  
ECOLE SUPERIEURE D'INGENIEURS GEOMETRES ET TOPOGRAPHES

---

**MEMOIRE**

**présenté en vue d'obtenir**

**le DIPLOME D'INGENIEUR CNAM**

**SPECIALITE : Géomètre et Topographe**

**par**

**Quentin Maouche**

---

Détection des câbles et pylônes électriques avec un drone équipé d'un capteur Lidar

**Soutenu le 10 septembre 2021**

---

**JURY**

Monsieur Jérôme VERDUN  
Monsieur Maxime MOST  
Monsieur José CALI

Président du jury  
Maître de stage  
Enseignant référent

## Remerciements

Dans un premier temps, je voudrais remercier mon référent de stage Monsieur Most Maxime ainsi que Monsieur Bottraud François et M. Rasolofonomenjanahary Jonatana, pour leur confiance dans la réalisation de ce Travail de Fin D'Etudes ainsi que pour leur disponibilité tout au long de son élaboration.

Je remercie également M. Authié Florent pour son aide et son temps apporté tout au long de ce mémoire.

Je tiens à remercier aussi mon professeur référent Monsieur Cali José pour le temps accordé à mon projet, ses conseils et sa disponibilité.

Je tiens à remercier toute l'équipe du cabinet Bbass pour leur aide et le partage de leurs connaissances afin de réaliser ce projet. Je les remercie aussi pour le temps qu'ils ont su m'accorder.

Je remercie aussi M. Deurveilher Jean-Nicolas de l'équipe Leica Geosystems, M. Olivier Allain de Blue Marble Geo et M. Wang Jimmy de GreenValley International pour nous avoir fourni une licence du logiciel Cyclone3DR, Global Mapper et Lipowerline.

Je souhaite ensuite adresser mes remerciements à tous mes professeurs et camarades de l'École Supérieure d'Ingénieurs Géomètres et Topographes (ESGT) du Mans, pour les connaissances et méthodes que j'ai pu acquérir tout au long de ma formation.

Enfin, je souhaite particulièrement remercier mes parents, pour leur soutien moral et financier, sans qui je ne serai pas là où j'en suis aujourd'hui.

## Liste des abréviations

2D / 3D : 2 Dimensions (X, Y) / 3 Dimensions (X, Y, Z)  
AGL : Above Ground Level (Au-dessus du niveau du sol)  
ASCII : American Standard Code for Information Interchange  
ASPRS : American Society for Photogrammetry and Remote Sensing  
CESML : Centrale Electrique de Saint-Martin-de-Londres  
DGAC : Direction Générale de l'Aviation Civile  
DJI : Da Jiang Innovation  
DSAC : Direction de la Sécurité de l'Aviation Civile  
EPSG : European Petroleum Survey Group  
ESGT : École supérieure d'ingénieurs géomètres et topographes  
FOV : Field of view  
GCP : Ground Control Point  
GLONASS : GLObal NAVigation Spoutnik System  
GPS : Global Positioning System  
GNSS : Global Navigation Satellite System  
HTA : Haute Tension A  
IMU : Inertial Measurement Unit  
LAS : LASer  
LASER : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation  
LAZ : LAS ZIP  
Lidar : Light Detection And Ranging  
MANEX : MANuel d'EXploitation  
MAP : Manuel d'Activité Particulière  
MCC : Multiscale Curvature Classification  
MNE : Modèle Numérique d'Élévation  
PDRA : Pre Defined Risk Assessment  
PPK : Post Processing Kinematic  
QZSS : Quasi-Zenith Satellite System  
RANSAC : RANdom SAmple Consensus  
RINEX : Receiver Independant Exchange Format  
RGB : Red Green Blue

RGP : Réseau GNSS Permanent  
RMS : Root Mean Square  
RTC 360 : Reality Terrestrial Capture 360  
RTK : Real Time Kinematic  
SBASS : Satellite-Based Augmentation Systems  
SBET : Smoothed Best Estimate of Trajectory  
TFE : Travail de fin d'études  
TIFF : Tagged Image File Format  
TIN : Triangulated Irregular Network  
UAS : Unmanned Aircraft Systems  
UAV : Unmanned Aircraft Vehicle  
VTOL : Vertical TakeOff and Landing

# Table des matières

<b>REMERCIEMENTS.....</b>	<b>2</b>
<b>LISTE DES ABREVIATIONS.....</b>	<b>3</b>
<b>TABLE DES MATIERES.....</b>	<b>5</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>7</b>
<b>PRESENTATION DE LA STRUCTURE D’ACCUEIL.....</b>	<b>9</b>
<b>I ÉTAT DE L’ART.....</b>	<b>10</b>
I.1 AUSCULTATION DES LIGNES ELECTRIQUES.....	10
I.2 LA TECHNOLOGIE LIDAR.....	11
I.2.1 Histoire et application.....	11
I.2.2 Fonctionnement du Lidar.....	12
I.2.2.1 Principe du Lidar.....	12
I.2.2.2 Le principe de retour d’onde / multi trajet.....	13
I.2.2.3 Les différents formats utilisés.....	14
I.2.3 Principe du géoréférencement du nuage de point.....	15
I.2.4 Paramètres de prise de points aériens.....	18
I.2.4.1 Les facteurs modifiables.....	18
I.2.4.2 Les facteurs externes.....	18
I.3 LA PLACE DU DRONE DANS L’ACQUISITION DES DONNEES.....	20
I.3.1 Historique.....	20
I.3.2 Les différents types de drones.....	20
I.3.2.1 Drone à voilure fixe.....	21
I.3.2.2 Drone à voilure tournante.....	21
I.3.2.3 Drone hybride.....	22
I.3.3 Les restrictions d’utilisation du drone.....	22
I.4 ALGORITHME DE SEGMENTATION / CLASSIFICATION.....	24
I.4.1 Algorithme de segmentation.....	24
I.4.1.1 Algorithme de segmentation basée sur la fusion.....	24
I.4.1.1.1 Algorithme de croissance de surface.....	24
I.4.1.1.2 Algorithme de division fusion.....	25
I.4.1.2 Algorithme de reconnaissance de forme géométrique.....	25
I.4.1.2.1 La transformée de Hough.....	25
I.4.1.2.2 Algorithme RANSAC.....	26
I.4.2 Algorithme de classification.....	27
<b>II CHAINE DE TRAITEMENT POUR LA DETECTION DES CABLES ELECTRIQUES DANS LE NUAGE DE POINTS DU LIDAR AEROPORTE.....</b>	<b>29</b>
II.1 LA PROBLEMATIQUE.....	29
II.2 LE CHANTIER.....	30
II.3 MOYENS A DISPOSITION ET PARAMETRES DE VOL.....	31
II.3.1 Moyens d’acquisition.....	31
II.3.2 Paramètres d’acquisition choisis :.....	32
II.4 TRAITEMENT DES DONNEES.....	33
II.4.1 Traitement de la trajectoire.....	33

II.4.2	<i>Traitement du nuage de points</i> .....	37
II.4.2.1	Global Mapper.....	38
II.4.2.1.1	Processus pour la détection des lignes électriques.....	38
II.4.2.1.2	Résultat de la classification / segmentation .....	39
II.4.2.1.3	Avantages et inconvénients .....	42
II.4.2.2	Le logiciel Lipowerline .....	43
II.4.2.2.1	Processus pour la détection des lignes électriques.....	43
II.4.2.2.2	Résultat de la classification / segmentation .....	44
II.4.2.2.3	Avantages et inconvénients .....	47
II.4.2.3	Cyclone 3DR.....	49
II.4.2.3.1	Processus pour la détection des lignes électriques.....	49
II.4.2.3.2	Résultat de la classification / segmentation .....	50
II.4.2.3.3	Avantages et inconvénients .....	51
II.4.3	<i>Logiciel répondant le mieux à notre problématique</i> .....	52
<b>III</b>	<b>DISCUSSION ET RESULTATS</b> .....	<b>53</b>
III.1	DIFFICULTES RENCONTREES .....	53
III.2	COMPARAISON DE SYSTEME D’INSPECTIONS .....	54
III.3	ANALYSE DES RESULTATS .....	55
	Conclusion.....	58
	Bibliographie.....	60
	Table des annexes .....	66
	Annexe 1 Tableau des catégories de drones .....	67
	Annexe 2 Chaîne de traitement .....	68
	Annexe 3 Traitement sous Global Mapper.....	75
	Annexe 4 Traitement sous Lipowerline .....	77
	Annexe 5 Temps de Travail.....	80
	Liste des figures .....	84
	Liste des tableaux .....	86

## Introduction

Le métier de géomètre ne cesse d'évoluer, de se diversifier et les évolutions technologiques sont nombreuses. Aujourd'hui avec le développement des technologies, le temps passé sur le terrain s'amointrit et le temps au bureau ne cesse d'augmenter. Cela est possible grâce au bouleversement de la prise de données par scanner statique, dynamique ou aéroporté. La profession a vécu une première révolution avec la photogrammétrie. Cependant, une révolution plus importante est en train de se former avec la technologie Lidar.

Dans la littérature, nous connaissons l'efficacité de cette technologie vis-à-vis des levés de façade, d'intérieur ou encore pour la production de MNE vis-à-vis de la photogrammétrie. Nous allons nous intéresser maintenant au sujet de l'auscultation des lignes électriques.

Pour prévenir et éliminer les dangers de chutes d'arbre sur les lignes électriques, des opérations de maintenance sont régulièrement menées. Le management des lignes électriques est un problème récurrent, car il nécessite des inspections régulières et longues. L'inspection des lignes électriques se fait principalement de manière pédestre à la vue des environnements complexes et difficiles rendant les patrouilles chronophages et peu efficaces.

Une autre manière d'inspecter des lignes électriques est l'utilisation d'un hélicoptère ou d'un avion, plus rapide, mais plus coûteux.

Une technique moins contraignante est apparue, l'inspection par drone équipé de capteurs photographiques. Cette méthode est très efficace, cependant dès que du bruit ou une végétation dense est présente les câbles électriques peuvent être difficiles à détecter.

La technologie Lidar présente certains avantages face à la photogrammétrie car elle n'est que peu impactée par la rotation, translation du drone et moins vulnérable aux conditions météorologiques difficiles.

Le drone équipé d'un capteur Lidar peut être une bonne alternative avec son développement constant à la vue de la sécurité amenée et de sa fiabilité.

Le sujet de mon travail de fin d'étude, portant sur la « détection des câbles et pylônes électriques avec un drone équipé d'un capteur Lidar », va être développé en trois parties.

Dans un premier temps, nous allons développer l'état de l'art de la technologie Lidar ainsi que de son vecteur de déplacement, le drone. Nous allons également aborder les algorithmes de détection semi-automatique et automatique de linéaires dans le nuage de points.

Puis dans un second temps, nous allons mettre en œuvre ce processus de détection semi-automatique, voire automatique, des lignes électriques dans le nuage de points à travers différents logiciels de traitements de nuages de points.

Enfin, nous allons amener une discussion au sujet de cette détection des lignes électriques dans les logiciels de traitements de nuages de points et ainsi apporter des précisions sur l'efficacité de la détection des lignes électriques par Lidar aéroporté ainsi que leurs traitements dans le nuage de points.

## Présentation de la structure d'accueil

Le cabinet Bbass est une société fondée en 1950, le nom Bbass provient de « Bottraud Barbaroux et Associés ». Cette société possède son siège social à Castries et plusieurs bureaux secondaires se trouvent à Agde, Saint-Gély-du-Fesc, Ganges, Le Vigan, Salindres et Bagnols-sur-Cèze (Figure 1).

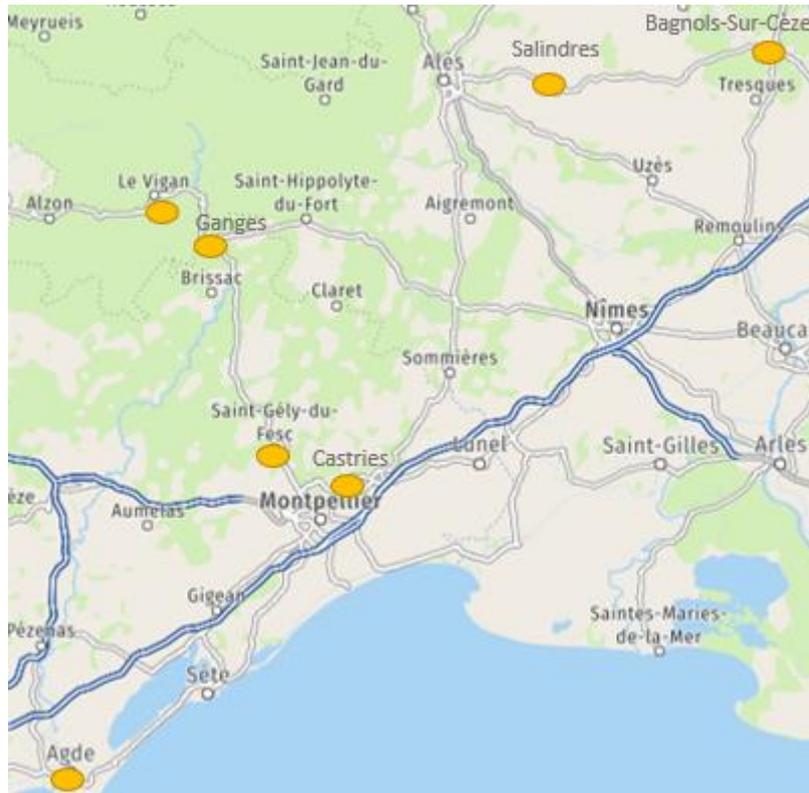


Figure 1: Localisation des différents sites [geoportail.gouv.fr]

Les activités du cabinet s'organisent autour de trois pôles : le pôle foncier, le pôle VRD et le pôle détection de réseau.

Sur ses 7 sites, la société Bbass regroupe 42 personnes, dont 3 géomètres-experts, 1 géomètre-expert salarié et 3 géomètres-experts stagiaires. Le cabinet est en développement constant.

Les partenaires du cabinet sont des particuliers, des collectivités, des professionnels de l'aménagement ou de la construction, des bureaux d'étude ...

Le cabinet possède certaines activités spécifiques comme les levés bathymétriques, les auscultations d'ouvrages anciens comme récents ou encore la modélisation 3D à l'aide de scanners 3D ainsi que la détection de réseaux.

Le cabinet Bbass possède un rayonnement géographique important et intervient sur différents types de missions pour répondre aux attentes de ses clients.

# I État de l'art

## I.1 Auscultation des lignes électriques

La distribution de l'énergie aux usagers est un facteur clé dans la qualité du service fourni par les compagnies électriques.

Les arbres qui tombent ou l'oscillation des câbles durant des conditions météo mauvaises peuvent amener à des coupures de courant sur la ligne si l'espace entre les câbles électriques et la végétation n'est pas respecté. Cela peut causer des pannes généralisées ou par exemple des feux de forêt [Azevedo et al, 2019].

Le réseau français de transport d'électricité est vulnérable face à des phénomènes météorologiques majeurs comme nous avons pu le voir avec les tempêtes Lothar et Martin au début du XXI<sup>e</sup> siècle.

Par la suite, de nombreux distributeurs d'électricité ont décidé de redimensionner leurs ouvrages afin d'empêcher la destruction de réseaux lors d'évènements climatiques majeurs. La sécurisation s'est matérialisée par la reprise de fondations, l'élargissement des tranchées forestières ou encore la mise en place de pylônes anti-cascade [www.rte-france.com].

Cependant, les câbles électriques peuvent être installés dans des endroits complexes d'accès, rendant l'inspection traditionnelle, pedestre et véhiculée, difficile et très peu efficace. Néanmoins, l'hélicoptère constitue quant à lui un outil rapide d'action, facile à mettre en place pour l'inspection mais avec comme défaut majeur son coût non négligeable.

Nous pouvons souligner que les lignes électriques ont plusieurs caractéristiques qui permettent de les différencier de leurs environnements facilitant ainsi leur reconnaissance dans les systèmes d'acquisition comme [Xiang, 2014] :

- Leurs courbures légères ;
- Leur certaine distance du sol ;
- Leur intensité qui diffère de la végétation environnante ;
- Leurs parallèles entre les différentes lignes présentes entre deux pylônes ;
- Leur épaisseur connue.

Une technologie est déjà présente pour l'inspection des câbles et pylônes électriques basée sur la photogrammétrie. C'est un procédé très efficace lorsque la scène est dégagée cependant dès que nous sommes en présence de canopées, les arbres interfèrent avec les câbles électriques. Dans de nombreux cas, les lignes électriques en forêt ne sont pas visibles depuis l'imagerie aérienne [Zhu et Hyypä, 2014].

## **I.2 La technologie Lidar**

### **I.2.1 Histoire et application**

Les premières mesures LIDAR ont été effectuées en mai 1962. Ces dernières furent réalisées par L.D. Smullin et G. Fiocco, pour une utilisation en tant que télémètre, afin de mesurer la distance Terre-Lune (*Project Luna See*). C'était une mise en application du laser à rubis développé par Théodore Maiman en 1960.

Cependant, la démocratisation du Lidar intervient seulement en 1971 lors de la mission Apollo 15 qui cartographie la Lune à l'aide d'un altimètre laser [Flamant, 2019].

Le développement de la technologie laser apparaît avec un fort engouement entre les années 1980 - 1990 et en 1996 Bushnell développe le laser 400LD ayant une capacité de 400 m. Avant 2007, le Lidar restait au stade d'expérimentation dans les universités et institut de recherches. Néanmoins, avec l'industrialisation de cette technologie ainsi que le développement des logiciels spécialisés, les produits LIDAR se démocratisent de plus en plus. Les derniers lidars ont été développés grâce à la démocratisation des drones [Wang et al, 2008].

Le Lidar est l'acronyme de Light Detection And Ranging traduisible par "Laser à émission et réception ». Le but du Lidar topographique est la détermination de la forme des objets de la scène, par mesure du temps de parcours du laser.

Les applications du Lidar sont nombreuses. Nous pouvons citer le dé-camouflage militaire, le guidage de voiture autonome, l'architecture, la détection de sites archéologiques dans la végétation dense, volcanique, l'inventaire forestier, la sismologie, l'impact météoritique, l'analyse des nuages et aérosols ou encore la bathymétrie et le Lidar flottant pour l'étude des vents au large des côtes [Poullain, 2013].

## I.2.2 Fonctionnement du Lidar

### I.2.2.1 Principe du Lidar

La mesure de la distance entre le scanner laser et l'objet se fait principalement par trois méthodes : la triangulation, la différence de phase et le temps de vol. Les scanners aéroportés fonctionnent principalement par mesure de temps de vol, bien plus adapté pour des mesures lointaines.

Cette méthode consiste à mesurer l'intervalle de temps ( $t$ ) entre l'émission et la réception d'une impulsion lumineuse. Nous utilisons la formule [Seguin, 2014] :

$$\Delta D = c \times \frac{t}{2}$$

$\Delta D$  : la distance parcourue entre le capteur et l'objet

$c$  : célérité de la lumière

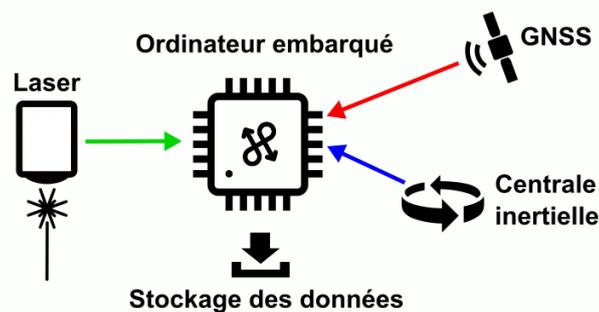


Figure 2: Composant du Lidar dynamique [www.onyxscan.com]

Un des composants principaux du Lidar (Figure 2), est le laser à balayage du scanner qui diffère suivant son utilisation. Nous avons le laser vert ( $\lambda = 532$  nm) qui permet une meilleure prise de donnée en milieu humide et les lasers infrarouges (entre 900 nm et 1500 nm) qui sont utilisés pour tous types d'opérations.

Nous pouvons ajouter que ce laser n'est rien sans un miroir pour pouvoir balayer le sol.

Il existe plusieurs types de balayage du sol (Figure 3) :

- Le balayage sinusoïdal ;
- Le balayage en ligne parallèle ;
- Le balayage elliptique.

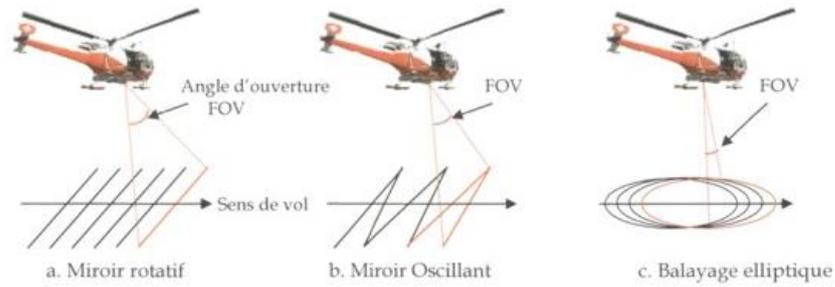


Figure 3: différents types de balayage du scanner [Vallet, 2011]

### I.2.2.2 Le principe de retour d'onde / multi trajet

Les Lidar à onde complète (ou Full Wave Form) permettent une restitution plus fine de la scène avec un nombre de retours supérieur à 5 échos. Ils permettent de déterminer avec plus de précision la distance entre les objets et le Lidar. Ce mode d'interprétation est très utile pour des environnements denses liés à la végétation ou au milieu urbain.

Les Lidar « multi-écho » ont un nombre de pics compris entre deux et cinq. Néanmoins, il est possible que le signal retour ne soit composé que d'un seul écho. Cela s'explique par la mesure directe, sans obstacle, entre le Lidar et la cible représentée par un pic unique dans le signal retour. De plus, les échos perçus représentent seulement les échos les plus intenses dépassant un certain seuil. Généralement, 90% des photons arrivant au récepteur proviennent des deux premiers pics, comme les lignes électriques [Xiang, 2014]. Seulement, le sol se trouve souvent dans les derniers pics ce qui complexifie la modélisation au vue de la pauvreté du nombre de retour.

Le signal de retour d'un système Lidar dépend de la cible, un écho long correspond à un objet naturel ou diffusif (canopée, nuages) et des échos courts à un objet dur comme les toits, le sol, etc (Figure 4) [Didier, 2020].

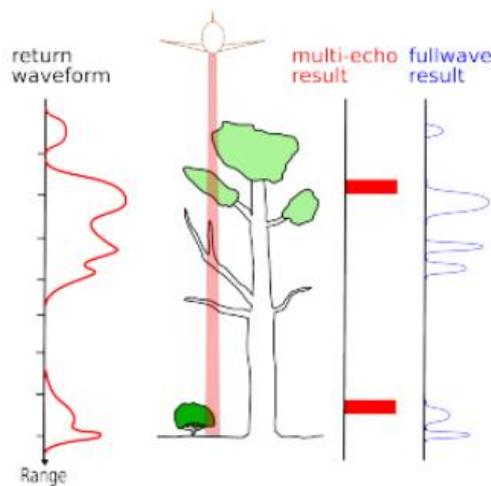


Figure 4: Retour d'onde en fonction des objets rencontrés [Didier, 2020]

### I.2.2.3 Les différents formats utilisés

Le format d'échange des données Lidar, au commencement, était ASCII (American Standard Code for Information Interchange), un fichier texte. Cependant, face aux besoins grandissants des utilisateurs et du volume de fichier généré par les capteurs lidar, ce format est vite devenu obsolète.

Pour pallier ce problème, l'association scientifique American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), créa le format Las qui provient des trois premières lettres du mot laser. C'est un format de fichier binaire ouvert à tous, il est plus approprié que le format ASCII car il contient plus d'informations et permet un meilleur stockage.

L'ASPRS met régulièrement à jour son format d'échange de fichier Lidar : le format LAS 1.0 date de 2003, le 1.1 de 2005, le 1.2 de 2008, le 1.3 de 2010 et le 1.4 de 2013. Au jour de la rédaction de ce mémoire, nous sommes au format 1.4 - R14, depuis 2019.

Un fichier LAS est composé de deux parties :

- Un en-tête composé de différentes informations, avec notamment la signature du fichier qui doit contenir les quatre lettres « LASF », l'emprise des données, la date, l'heure, le nombre de points dans le nuage, le nombre de points par retour ou encore la version utilisée (las 1.3, las 1.4, etc.) ;

- Une liste de points avec pour chaque ligne des informations comme les coordonnées X, Y, Z, l'intensité, le numéro de retour, le nombre de retour, l'angle de balayage, l'heure GPS, la classe, ou encore la couleur RGB [<https://www.asprs.org>].

La société RapidlassoGmbH9 a aussi développé en 2012 un format compressé du fichier ".las" : le ".laz", issu de la librairie ouverte LASzip. Cette compression permet de réduire la taille des fichiers de points de 70 à 80% en comparaison au format LAS.

Les données sous format las. sont réparties dans une table et affectées à des valeurs de classification. Ces valeurs sont définies par l'ASPRS (Tableau 1) [Doceul, 2017].

Valeur de classification	Significations	Valeur de classification	Significations
0	Jamais classé	11	Surface routière
1	Non attribué	12	Réservé
2	Sol	13	Fil de protection
3	Végétation Basse	14	Fil conducteur
4	Végétation moyenne	15	Tour de Transmission
5	Végétation haute	16	Connecteur de structure filaire
6	Bâtiment	17	Tablier de Pont
7	Point bas	18	Bruit élevé
8	Réservé	19-63	Réservé
9	Eau	64-255	Définis par l'utilisateur
10	Rail		

Tableau 1: Classification des valeurs au format las

### I.2.3 Principe du géoréférencement du nuage de point

La centrale inertielle est un système permettant de mesurer la vitesse, la position et l'attitude du drone, avec notamment les angles de roulis, tangage et lacet grâce à trois accéléromètres, gyromètres. Le système Lidar étant fixé au drone, la mesure de l'attitude du drone est celle du Lidar. En réalité, le drone compense en temps réel les angles de roulis, tangage et lacet afin d'obtenir de bonne qualité de prise de données.

Le système GNSS permet de se positionner dans un système de référence absolue. Pour corriger la trajectoire du drone, les observations des stations du RGP (Réseau GNSS Permanent) peuvent être utilisées en cas d'absence de station au sol. Cependant pour avoir une qualité optimale de positionnement, une antenne GNSS Pivot doit être présente sur site. Cette méthode permet de réduire le bruit apporté par l'imprécision de l'antenne GNSS et la dérive de la centrale inertielle. Un logiciel de post-traitement est nécessaire pour corriger la trajectoire et ainsi obtenir une bonne qualité de trajectoire. La précision des coordonnées est principalement liée à la méthode de traitement utilisée.

L'antenne GNSS et la centrale inertielle sont combinées et corrigées des différents bruits à l'aide d'un filtre de Kalman [Chauveau, 2014]. Cet algorithme permet de réajuster la trajectoire de la centrale inertielle en s'appuyant sur les positions GNSS et ainsi éviter une dérive de la centrale inertielle au cours du temps.

Afin de pouvoir contraindre le géoréférencement du levé de façon précise, nous pouvons placer des points de repère au sol, des GCP (Ground Control Point). Ces points de vérification permettent un contrôle des données afin d'estimer les erreurs de positionnement.

La centrale inertielle et le capteur GNSS de haute précision participe au calcul de la trajectoire apportant leur précision pour contraindre la trajectoire du nuage de (Figure 5). Les données GNSS sont corrigées grâce au pivot mis en place proche du chantier ou une station du RGP à une distance inférieure à 20 km du levé.

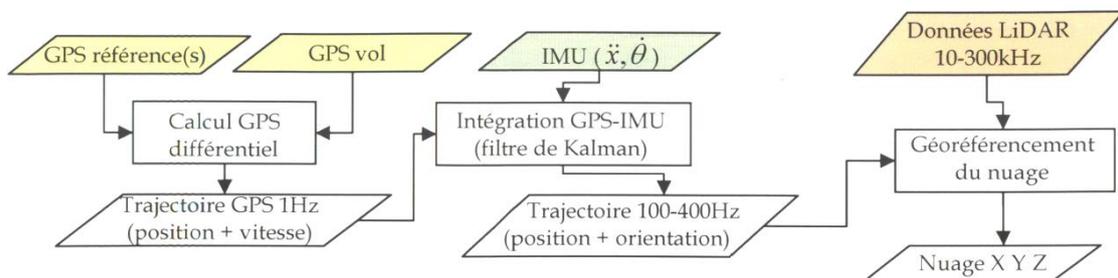


Figure 5: Schéma de géoréférencement du nuage de point [Vallet, 2011]

Cependant le géoréférencement direct permet d'éviter l'utilisation de points de contrôles, GCP, pour contraindre le nuage comparé au géoréférencement indirect.

Pour géoréférencer un nuage de point, nous utilisons la formule suivante :

$$\mathbf{X}_P^E = \mathbf{X}_{IMU}^E + \mathbf{R}_{IMU}^E \times \mathbf{R}_{ALS}^{IMU} \times (\mathbf{e}_{IMU}^{ALS} + \mathbf{R}(\alpha_P) \times \mathbf{d}_P)$$

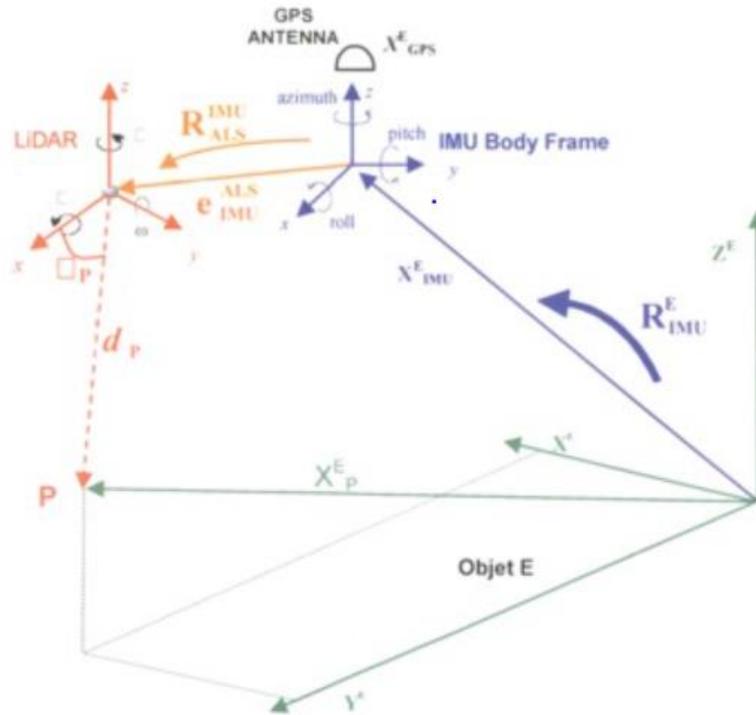


Figure 6: Géoréférencement direct du nuage de points [Vallet, 2011]

- $\mathbf{X}_P^E$  = Position du point P dans le référentiel terrain E ;
- $\mathbf{X}_{IMU}^E$  = Position du centre de navigation dans le référentiel terrain E, donné par la position GPS soit  $\mathbf{X}_{IMU}^E = \mathbf{X}_{GPS}^E + \mathbf{R}_{IMU}^E \times \mathbf{e}_{IMU}^{GPS}$  ;
- $\mathbf{R}_{IMU}^E$  = Matrice de rotation permettant d'aligner le repère IMU au repère terrain (Mesure des angles de roulis, lacet et tangage) ;
- $\mathbf{R}_{ALS}^{IMU}$  = Matrice de rotation permettant d'aligner le repère IMU au repère LIDAR ;
- $\mathbf{e}_{IMU}^{ALS}$  = Bras de levier entre IMU et LIDAR ;
- $\mathbf{e}_{IMU}^{GPS}$  = Bras de levier entre IMU et centre de phase de l'antenne GPS ;
- $\mathbf{R}(\alpha_P)$  = Vecteur directeur du rayon laser dans le référentiel Laser ;
- $\mathbf{d}_P$  = Distance mesuré par le Laser dans le repère LIDAR.

## I.2.4 Paramètres de prise de points aériens

### I.2.4.1 Les facteurs modifiables

Comme vu précédemment, les mesures Lidar peuvent être entachées de différentes erreurs. Nous pouvons jouer sur la densité de points qui dépend du recouvrement, de la fréquence d'impulsion, de l'angle d'ouverture, mais aussi de la hauteur et de la vitesse de vol.

Le recouvrement peut être utilisé pour les zones non couvertes entre les vols, faciliter l'ajustement entre les différentes lignes de vol et diversifier les angles de visées pour limiter les ombrages (Figure 7).

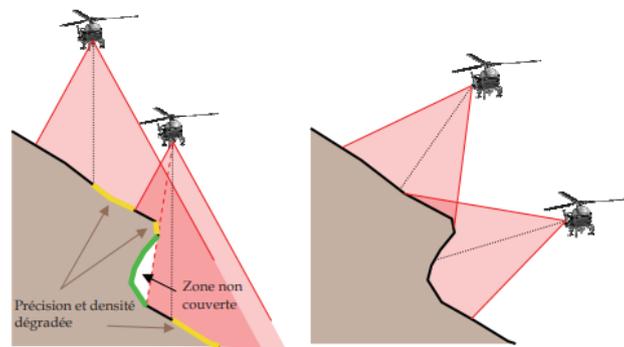


Figure 7: Acquisition nadirale (Gauche) et acquisition oblique (Droite) [Vallet, 2011]

### I.2.4.2 Les facteurs externes

Le relief du terrain est un facteur important lors du levé Lidar. Le drone décolle d'un certain point et possède une hauteur qui peut varier en fonction de la morphologie du terrain.

La configuration du terrain entraîne aussi un recouvrement inégal entre les lignes de vol.

Les conditions météorologiques n'ont pas un rôle prépondérant lors d'un levé Lidar. Le Lidar peut être influencé par une luminosité trop importante, mais fonctionne de jour comme de nuit. Il n'est que peu influencé par les contrastes de lumière, car il utilise un laser, néanmoins les nuages peuvent apporter des ombrages. Le vent est quant à lui un vecteur important, car le drone ne peut pas voler si le vent est trop important.

D'après [Boulaassal, 2010], la réflectance n'est pas la même sur l'entièreté du levé, elle peut être influencée par :

- La couleur de la surface ;
- Les propriétés des matériaux composant l'objet (permittivité électrique, magnétique, perméabilité, conductivité) ;
- L'orientation de la surface par rapport au faisceau incident ;
- La luminosité ambiante ;
- La température de la surface ;
- L'humidité de la surface ;
- La rugosité de la surface.

Nous pouvons ajouter à travers le graphique suivant (Figure 8), la réflectance de différents matériaux en fonction de leurs longueurs d'onde.

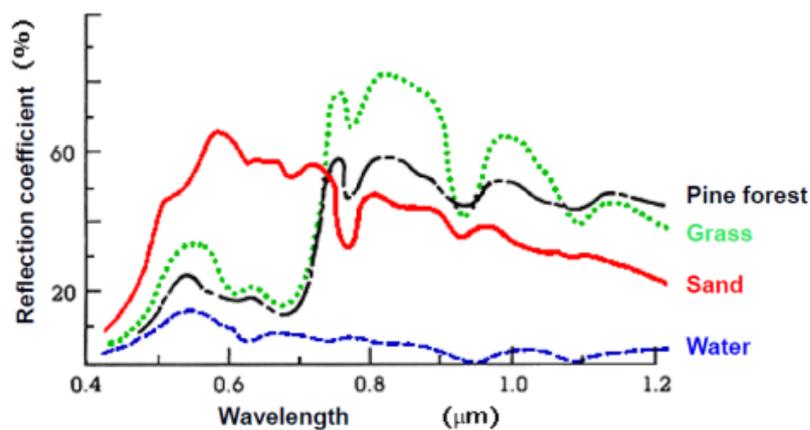


Figure 8: Réfraction de matériaux en fonction de la longueur d'onde [Didier, 2020]

Cet autre graphique (Figure 9), met en scène la réflectance de matériaux humides et secs en fonction de leurs longueurs d'onde.

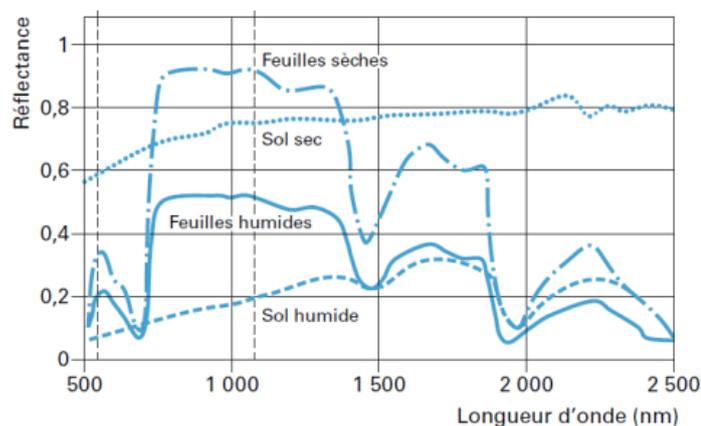


Figure 9: Graphique de matériaux en fonction de leur humidité [Didier, 2020]

## **I.3 La place du drone dans l'acquisition des données**

### **I.3.1 Historique**

L'histoire des drones remonte à la Première Guerre mondiale où ils ont été développés pour un usage militaire. Le premier drone sans pilote commandé par onde, l'Aerial Target, a été créé par Archibald Low dès 1916. Au même moment en 1917 aux États-Unis un avion radiocommandé, le Hewitt-Sperry Automatic Airplane est imaginé. Du côté français le premier vol sans pilote, le Voisin, voit le jour en 1917.

Au vu de l'engouement et des réductions de coût humain importantes que peut apporter le drone sans pilote, l'essor du drone intervient avec la guerre froide [<https://www.studiofly.fr>].

Depuis ces années, les drones militaires n'ont cessé de se développer pour surveiller, se défendre ou réaliser des opérations ciblées comme le « Predator », drone américain.

Depuis les années 2000, les drones sont utilisés dans les domaines suivants : l'agriculture, la gestion forestière, l'archéologie, la gestion de situation d'urgence, la modélisation 3D ainsi que l'auscultation d'ouvrage linéaire [Tournadre, 2015], mais la démocratisation, plébiscitée par le constructeur Dji, de ces drones pour un usage privé a permis l'essor que l'on connaît aujourd'hui.

Le marché actuel se compose d'une multitude de drones allant de quelques grammes, comme le black hornet 3, à des centaines de kilos comme le predator susdit.

### **I.3.2 Les différents types de drones**

Plusieurs types de drones existent, pour les comparer nous pouvons nous appuyer sur leurs capacités, taille et puissance. Il en ressort 4 catégories : les drones de grande taille, moyenne taille, micro et nano. Nous pouvons souligner que tous les types de drones sont plus sensibles aux conditions météorologiques que les hélicoptères et avions et leurs missions diffèrent selon leurs caractéristiques. Nous aborderons seulement les drones micro et nano qui représentent ceux que l'on utilise le plus au quotidien pour nos travaux, au vu de leur poids et de la réglementation européenne [Anderson et Gaston, 2013] (Voir Annexe 1).

### I.3.2.1 Drone à voilure fixe

Les drones à voilure fixe (Figure 10) décollent grâce à un lancer manuel ou un catapultage. Pour atterrir, ils glissent sur le sol, c'est une opération délicate, car il faut un endroit suffisamment plat, ouvert et d'une matière à absorber les chocs. Ce procédé peut endommager les capteurs se trouvant dans la tête du drone. Pour amortir et alléger ces drones qui ont une envergure importante, plusieurs mètres, leur composant principal est le polystyrène.

Ils sont faciles à piloter, mais ne peuvent réaliser de vol stationnaire.

Ces drones atteignent des vitesses plus élevées que les drones à voilure tournante, disposent d'une plus grande autonomie (plusieurs heures), peuvent soulever des charges moins importantes mais voler à plus haute altitude. Ces avantages sont le résultat de la dimension de ces drones et de la maîtrise de leurs consommations liées au phénomène de planage.

Ces drones permettent d'atteindre des surfaces inaccessibles aux drones à voilure tournante et sont prédominants pour les grandes surfaces comme des opérations de cartographie, épandage de culture, d'observation... [Vandenbroek, 2018]

Cependant, ils sont très peu utilisés car il est difficile d'obtenir les autorisations de vol.

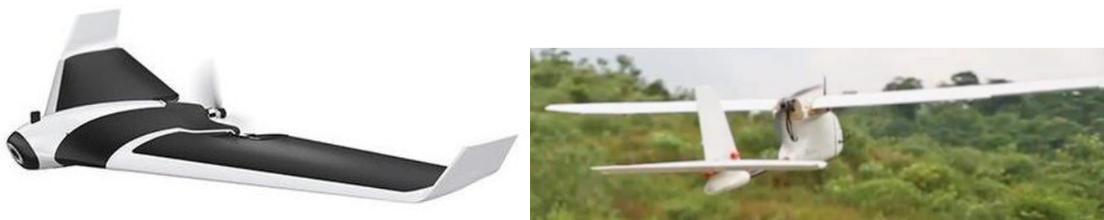


Figure 10: Parrot Disco [Lesnumeriques.com] (À Gauche) Drone Pixfly [Escadrone.com] (À Droite)

### I.3.2.2 Drone à voilure tournante

Les drones à voilures tournantes (Figure 11) se différencient des drones à voilures fixes par leur capacité à réaliser des décollages verticaux et des vols stationnaires.

Ces drones sont aussi appelés hélicos ou multirotors, ils se rapprochent de l'hélicoptère.

Le nombre d'hélices que peut posséder un drone à voilure tournante varie de 2 à 8, permettant une plus grande maniabilité que ceux à voilures fixes.

Au vu de leur poids, ils sont plus sensibles aux conditions météorologiques, peuvent soulever des charges plus importantes et possèdent une autonomie amoindrie par rapport aux drones à voilures fixes.

De plus, ces drones demandent une maintenance plus importante que les drones à voilure fixe.

Tout cela amène à un pilotage plus précis, générant peu de vibrations et une meilleure stabilité de vol conduisant à la prise de données nécessitant une précision adéquate comme pour la photogrammétrie.

Ces drones sont utilisés pour réaliser des missions d'inspection, de surveillance ou encore de destruction d'objet... [Vandenbroek, 2018]



Figure 11: Drone M300 RTK [DJI.com] (À Gauche) Drone Parrot Anafi [Parrot.com] (À Droite)

### I.3.2.3 Drone hybride

Les drones hybrides (Figure 12) sont des drones à voilure fixe et tournante de type VTOL (Vertical takeoff and landing : Décollage et atterrissage vertical). Ces drones allient les avantages des deux catégories de drones, c'est-à-dire rapidité de vol, autonomie accrue, stabilité augmentée, transport de charges plus importantes, décollages et atterrissages verticaux, cependant les vols stationnaires ne sont pas possibles.



Figure 12 : Drone Heliplane [Dronevolt.com] (À Gauche) Drone CH-804C [estpendulum.com] (A Droite)

### I.3.3 Les restrictions d'utilisation du drone

La catégorie du drone, ouverte ou spécifique, importe peu, les vols doivent toujours se faire de jour, jamais de nuit. On parle alors de nuit aéronautique, c'est-à-dire la période

entre la fin du crépuscule civil et le début de l'aube civile. On simplifie généralement en disant que cette nuit s'étend de 30 min après le coucher du soleil et 30 min avant le lever du soleil.

Le graphique suivant (Figure 13) met en scène les restrictions d'utilisation du drone dans les zones proches des aérodromes afin d'éviter tout risque de collision avec un aéronef. Ces restrictions peuvent impacter les opérations de levé par drone cependant la plupart des vols se font à une hauteur de 50 m ou moins pour une précision optimale donc la gêne est limitée. Cependant, ces restrictions correspondent à un risque réel à ne pas oublier. Elles font référence aux nouvelles normes européennes mises en place au 31/01/2021.

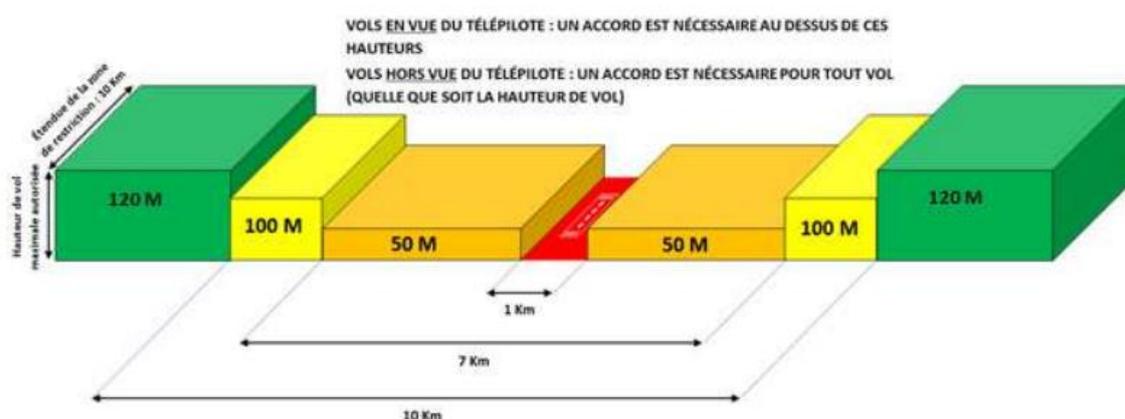


Figure 13: Zones de restrictions des hauteurs de vols à proximité d'un aérodrome [digitalworks-aircraft.com]

Des zones de l'espace aérien peuvent être « interdites » (P), « réglementées » (R) ou « dangereuses » (D).

De plus, nous pouvons être en présence de zones ou établissements où il existe une interdiction de survol à basse hauteur. Nous pouvons ainsi compter les parcs régionaux et réserves naturelles, les hôpitaux, prisons et certains sites industriels [<https://www.techno-science.net>].

Nous pouvons avoir une idée de ces restrictions sur le site Géoportail ou l'application Mach7drone.

Le pilote de drone n'est pas nécessairement un géomètre, il doit avoir des connaissances en électronique, météorologie, législation et savoir lire les cartes.

La législation européenne est encore en constante évolution, ce qui nous pousse à nous maintenir en éveil constant pour ne pas passer à côté de toute information importante et ainsi ne pas être à l'encontre de la réglementation.

## **I.4 Algorithme de Segmentation / Classification**

### **I.4.1 Algorithme de segmentation**

Un grand nombre de méthodes de segmentation de nuage de points existe dans la littérature. [Pu et Vosselman, 2006] définissent la segmentation d'un nuage de points 3D comme étant un « processus de labélisation de chaque point du nuage de points, de façon que ces points, appartenant à telle ou telle surface ou région, aient le même label ». Une grande partie de ces méthodes de segmentation proviennent d'algorithmes de segmentation d'image (2D) adaptés au nuage de points (3D). Cependant, certaines méthodes réalisant le passage de la 3D à la 2D occasionnent une perte d'information. Il est vite apparu la nécessité de segmentation spécifique aux nuages de points [Boulaassal, 2010].

#### **I.4.1.1 Algorithme de segmentation basée sur la fusion**

##### **I.4.1.1.1 Algorithme de croissance de surface**

La croissance de surface pour la segmentation des nuages de points est l'équivalent de la croissance de région pour les images [Boulaassal, 2010].

Le principe de l'algorithme de croissance de surface repose sur l'identification de surface graine (modèle) et de leurs accroissements vers les points voisins. Il faut bien choisir la phase d'initialisation, c'est-à-dire le choix de la surface de départ (germes), autour de laquelle la surface va être construite. Cette surface est très importante, car tout dépend de celle-ci pour l'accroissement futur. Cette surface est développée par l'algorithme tant que les points voisins ont des critères similaires. Si les points voisins ne répondent plus aux mêmes critères, l'algorithme s'arrête et clôt la surface.

Cet algorithme est sensible au bruit qui va venir fausser les résultats de celui-ci en créant des zones de sous-segmentation ou de sur-segmentation [Marchand, 2018] [Simonetto, 2020].

Contrairement à la transformée de Hough et RANSAC, l'algorithme de croissance de surface est une méthode de segmentation qui ne prend en compte que le voisinage local, lui permettant de détecter des détails assez fins [Vosselman, 2006].

#### **I.4.1.1.2 Algorithme de division fusion**

Cette segmentation repose sur la structuration de données en octree.

L'algorithme teste chaque cube avec un critère (d'homogénéité), si le critère n'est pas respecté, le cube se divise en 8 sous-cubes et ainsi de suite. Ce processus s'effectue jusqu'à ce que tous les cubes respectent le critère, ou jusqu'à obtenir des cubes vides [Boulaassal, 2010].

L'algorithme va calculer le meilleur plan possible dans chaque sous-cube à partir des points par estimation des moindres carrés. Si les conditions sont respectées, les deux segments plans voisins seront fusionnés. Néanmoins, il faut prendre en compte la position de chaque sous-cube les uns par rapport aux autres, car deux segments plans peuvent se situer l'un au-dessus de l'autre. Dans ce cas, la fusion serait incohérente et apporterait des erreurs [Marchand, 2018].

#### **I.4.1.2 Algorithme de reconnaissance de forme géométrique**

Cette segmentation est basée sur la reconnaissance de formes géométriques. Deux algorithmes se détachent largement par leur utilisation commune et leur performance reconnue. Il s'agit de l'algorithme RANSAC, créé par Fischler et Bolles en 1981, et de la transformée de Hough mise au point par Hough en 1962.

##### **I.4.1.2.1 La transformée de Hough**

La transformée de Hough est une méthode de reconnaissance de lignes dans des photographies qui a été adaptée à la détection de plans dans un nuage de points 3D. [Vosselman et al, 2004] présentent la transformée de Hough 3D en l'appliquant à la segmentation de données laser terrestres acquises sur des équipements industriels cylindriques et sphériques.

L'intersection de plusieurs surfaces indique la présence potentielle d'un plan. Pour détecter le plan le plus probable, un vote a lieu. Ce vote se base sur le calcul de la distance entre chaque point et chaque plan défini pour tous les points du nuage. Si cette distance est

inférieure à un certain seuil on ajoute +1 au score. Par la suite, la surface ayant le score le plus élevé est choisie [Simonetto, 2020].

Les avantages de la transformée de Hough sont la capacité de traiter avec des occlusions, de détecter plusieurs instants d'un objet et la sensibilité au bruit.

Les désavantages principaux de la transformée de Hough sont la difficulté de choix des paramètres adéquates et le temps de traitement qui augmente de manière exponentielle avec le nombre de points traités amenant des lignes parasites [Qing Xiang, 2014].

Plusieurs développements de cette méthode ont eu lieu :

- [Axelsson, 1999] a présenté une méthode de classification de ligne électrique par recherche de structures linéaires parallèles en 2D, basées sur des transformations de Hough ;
- [Melzer et Briese, 2004] ont proposé une méthode d'extraction des lignes électriques avec l'utilisation de la transformée de Hough en 2D et une méthode d'ajustement 3D de la courbe des caténaïres ;
- [Liu et al, 2009] ont détecté les lignes électriques dans une image 2D en échelle de gris, par intensité du retour laser et une transformée de Hough améliorée.

#### **I.4.1.2.2 Algorithme RANSAC**

L'algorithme RANSAC (RANDOM SAMPLE CONSENSUS) est un outil très largement répandu lorsque vient le besoin d'interpoler des données fortement bruitées.

Cet algorithme est utilisé pour des nuages de points de tailles non négligeables avec un temps de calcul, plus efficient vis-à-vis de la transformée de Hough.

RANSAC est un algorithme basé sur les probabilités, pour avoir un bon résultat il faut un nombre suffisant d'itérations afin d'étudier un maximum de probabilités. Pour ce faire, une droite est créée par rapport aux points du nuage de façon aléatoire. Cette étape est répétée un nombre  $k$  de fois. Une fois les itérations terminées, la forme géométrique qui approxime le plus de points (inlier) est extraite et l'algorithme renouvelle cette opération avec les points restants (outlier) [Marchand, 2018] [Simonetto, 2020].

Les inliers sont les points qui font partie du modèle, de la forme géométrique et les outliers sont les points aberrants qui sont éloignés du modèle, de la forme géométrique.

Plusieurs développements de cette méthode ont eu lieu :

- [Kim et Sohn, 2010] ont utilisé RANSAC comme technique de classification dans l'analyse des composants principaux de l'extraction d'entités de forêts.

[Tarsha-Kurdi et al, 2007] ont réalisé une comparaison entre les algorithmes de la transformée de Hough 3D et RANSAC. Ils en tirent la conclusion que l'algorithme de RANSAC est plus adapté que la transformée de Hough pour la détection automatique des plans de toit au niveau du temps de traitement et de la sensibilité au bruit.

Cependant cet algorithme a l'inconvénient de privilégier le plus grand plan de la scène et non les plus petits plans [Ait-Mansour, 2014].

L'association d'algorithmes permet d'obtenir de meilleurs résultats comme [Boulaassal, 2010] avec la combinaison de l'algorithme RANSAC et d'un algorithme de croissance de région.

#### **I.4.2 Algorithme de classification**

La classification des données Lidar est devenue un enjeu primordial du fait de l'explosion des nuages de points. De nombreuses possibilités de classification sont apparues. Nous allons en détailler les principales.

Les classifications peuvent se faire de plusieurs manières, nous pouvons détailler les classifications suivant les échos (premier, deuxième, troisième ...), les classifications basées sur l'élévation, l'intensité, la densité, le gradient, mais aussi les classifications en octree, kd-tree, K-means [Yang et al, 2016].

L'une des classifications les plus connues est la classification par TIN itératif (Triangulated Irregular Network).

Cette méthode classe les points au sol en créant un maillage du sol lors d'un processus itératif. Cet algorithme débute par une série de points graines et ajoute de manière itérative

des points répondant à quatre critères spécifiques : la hauteur maximale de l'objet, la pente maximale du terrain, un angle et une distance. Cela permet d'affiner la surface.

L'angle est mesuré entre le point cible et la surface du TIN, et la distance est celle entre le point cible et la surface. Un point doit répondre aux deux critères pour être ajouté au sol. C'est un des algorithmes le plus robuste et le plus présent dans les logiciels de traitement Lidar avec des terrains escarpés [Thoury, 2017].

[Axelsson, 1999] utilise un TIN pour détecter les différents plans des bâtiments pour les différencier de la végétation.

K-means est un algorithme de clustering. Il permet de regrouper en clusters les observations. Les données similaires seront regroupées dans un même cluster. Par ailleurs, une observation ne peut appartenir à deux clusters différents. Elle appartient à la classe dont le centre est le plus proche.

Pour résumer, l'algorithme K-means, se compose de 3 étapes :

- Initialisation des classes ;
- Affectation des points, dont le centre est le plus proche de la classe ;
- Actualisation des centres de classes à partir des points composant la classe.

Les itérations se poursuivent jusqu'à ce que les classes ne changent plus [BENNIS, 2015].

De plus, nous pouvons noter que les algorithmes octree et KD-tree sont généralement les structures de bases utilisées pour organiser en quadrillage et améliorer l'interactivité des données.

## II Chaîne de traitement pour la détection des câbles électriques dans le nuage de points du Lidar aéroporté

### II.1 La problématique

La coopérative électrique se situe sur la commune de Saint-Martin-de-Londres, à 25 km au nord de Montpellier, dans le département de l'Hérault (34) (Figure 14).



Figure 14: Plan de situation de la zone de levé [Géoportail]

La coopérative est un client régulier du cabinet Bbass, pour lequel le cabinet a des rôles de maîtres d'œuvre pour des lotissements, l'auscultation de barrage ou le relevé de réseaux enterrés.

Les lignes électriques dépendent de la CESML (Coopérative Électrique de Saint-Martin-de-Londres) qui produit, un pourcentage de son électricité transportée, grâce au barrage hydraulique du moulin de Bertrand. Elle fournit en électricité un total de 50 collectivités locales (Figure 15).

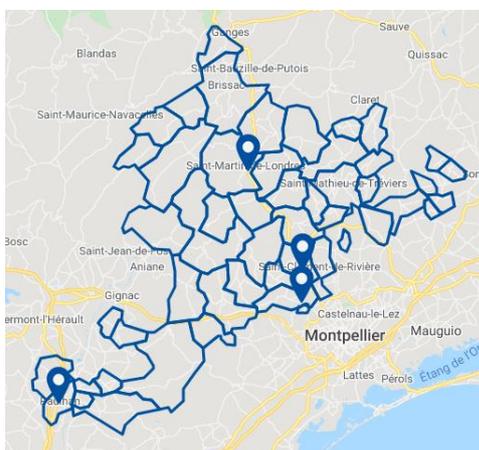


Figure 15: Collectivité locale fournit par la CESML [CESML] (À Gauche) Barrage de Bertrand [CESML] (À Droite)

La coopérative possède 900 km de ligne HTA dont 70 % sont enfouies. Cependant, les 30 % restant nécessitent une gestion plus poussée que les lignes enterrées, car elles sont soumises à des aléas climatiques et à la végétation envahissante.

Ainsi ils rencontrent une nouvelle problématique pour le géoréférencement de leurs lignes électriques et le contrôle de celles-ci pour détecter la végétation proche des lignes et ainsi prévoir des coupes, alimenter un SIG... Ce contrôle des lignes est très rarement réalisé car seulement 2 solutions leur sont offertes, l'inspection par voie pédestre à vue, fastidieuse et lente ou l'inspection avec un hélicoptère par contrôle visuel rapide mais très onéreuse obligeant ainsi le contrôle de tout le réseau pour des questions de rentabilité.

La détection des lignes électriques pourrait être une alternative pour des relevés plus ciblés à moindre coût pour les besoins de la coopérative. La classification automatique de celles-ci serait un plus au vu des 270 km de lignes à relever.

## II.2 Le chantier

Le site test représente l'environnement commun où évoluent les lignes électriques c'est-à-dire un terrain en zone rural avec une urbanisation inexistante. Le terrain est accidenté voire très escarpé avec des dénivelées importantes (Figure 16). De plus, les lignes sont souvent hors de vue pour une auscultation pédestre. Nous sommes également en présence d'arbres pouvant occasionner une gêne vis-à-vis de l'inspection des lignes électriques.



Figure 16: Photo de la ligne électrique levée

Notre chantier se trouve proche du Pic Saint Loup où se situent des restrictions (en bleu) et interdictions (en rouge) de vol lié à un couloir de vol de planeur (Figure 17).

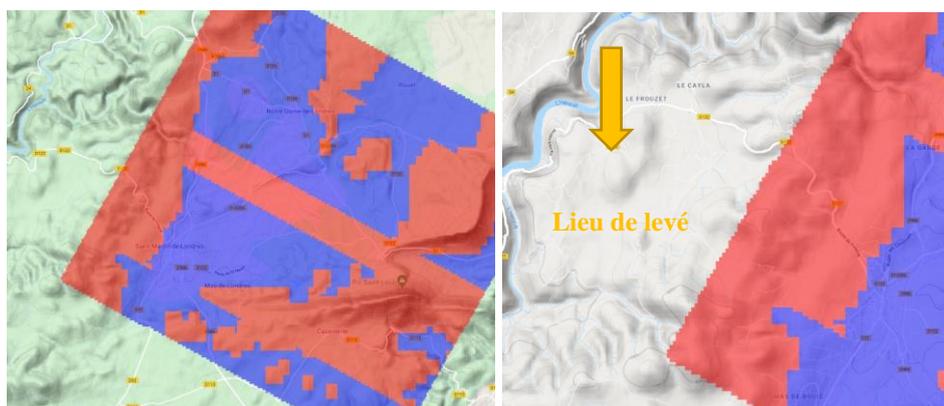


Figure 17: Carte des restrictions de vol sur la zone, échelle non définie [mach7drone.com]

## II.3 Moyens à disposition et paramètres de vol

### II.3.1 Moyens d'acquisition

Pour cette mission, le cabinet Bbass a loué un drone Dji Matrice 600 PRO et un capteur Lidar YellowScan Vx-20 (figure 18).

Le drone M600 PRO possède une autonomie allant de 18 min à 35 min, il peut atteindre une vitesse de 65 km/h ainsi que résister à des vents de 30 km/h (Figure 19). Il possède une masse de 10 kg pouvant emporter une charge maximum de 5.5 kg, il se positionne avec une précision de l'ordre de 0.5 m en vertical et 1.5 m en horizontal.

Le YellowScan Vx-20 possède un poids de 3.1 kg et dispose d'une autonomie de 1h30. Il émet jusqu'à 100 000 impulsions par seconde pouvant aller jusqu'à 5 échos.

Ce capteur possède une précision entre les données acquises de l'ordre de 1 cm et une exactitude vis-à-vis de la réalité terrain de l'ordre de 2.5 cm.



Figure 18: Drone M600 PRO avec un Lidar Vx-20

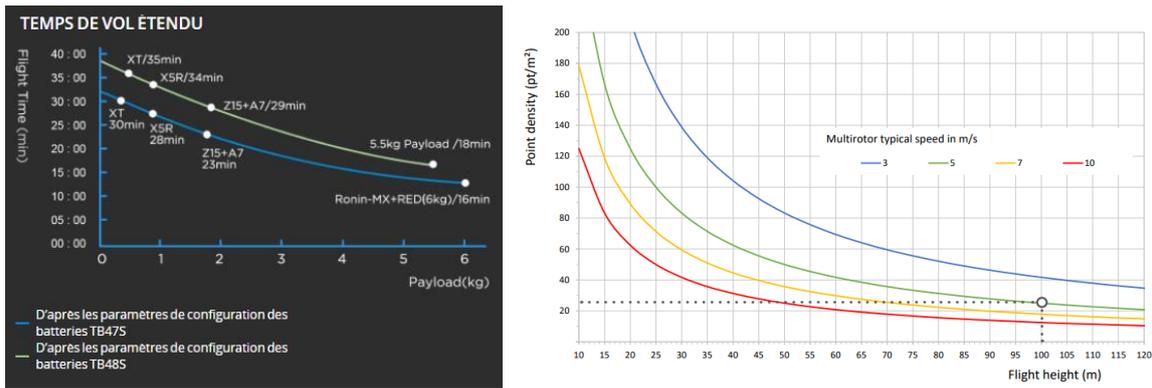


Figure 19: Temps de vol du drone M600 [Dji.com] (À Gauche) Densité du Lidar [Yellowscan.fr] (À Droite)

### II.3.2 Paramètres d'acquisition choisis :

Lors de notre acquisition, nous avons décidé de privilégier une vitesse lente de l'ordre de 18 km/h et une hauteur assez proche du sol, 50 m agl. Nous avons pris ces paramètres de vol, car nous nous intéressons aux câbles électriques et leurs environnements proches. Cette hauteur est suffisamment proche du sol tout en étant au-dessus des câbles électriques, se trouvant à 30 m du sol, afin d'éviter toute interférence. De plus c'est une hauteur préconisée pour réaliser les différentes acquisitions évitant ainsi au maximum les trous dans l'acquisition et limitant l'écart entre les points du nuage.

La vitesse du vent ce jour-là était de l'ordre de 10 km/h, n'engendrant que peu de gêne pour le drone.

Nous pouvons ainsi prétendre à une densité de l'ordre de 50 points/m<sup>2</sup> en un seul vol (Figure 19).

Avec une hauteur de vol de 50 m agl et un FOV de 60° de part et d'autre du nadir, nous obtenons une fauchée de 175 m permettant un levé détaillé de l'entièreté de la zone. A cette hauteur nous obtenons une erreur de reprojection au sol, lié à l'antenne GNSS, de l'ordre de 3 cm pouvant aller jusqu'à 6 cm à une hauteur de vol de 100 m.

Lors de la planification de vol nous avons prévu un recouvrement de l'ordre de 30% au vu de la morphologie du terrain afin d'avoir le moins de masques possible.

Sur le terrain, nous avons mis en place un pivot GNSS PPK au centre du chantier prenant des données à 1 Hz. Par la suite, nous avons placé le lidar sur le drone le plus près possible du centre de gravité de celui-ci tout en installant l'antenne GNSS le plus loin possible des antennes GNSS du drone afin d'éviter toutes perturbations.

Dans un second temps, nous avons initialisé l'appareil au sol jusqu'à ce qu'il obtienne une constellation de satellites suffisante, avec un minimum de 7 satellites. Nous obtenons une constellation de plus de 12 satellites suffisants pour réaliser une bonne acquisition. Une fois l'initialisation de la position réalisée, les led du lidar se figent pour signifier que le système est initialisé. Après cette étape, nous avons initialisé la centrale inertielle en vol par des accélérations avant, arrière, avant, et un virage serré. Cet exercice a été réalisé au début et à la fin du levé pour améliorer nos résultats lors du post-traitement (Figure 20).

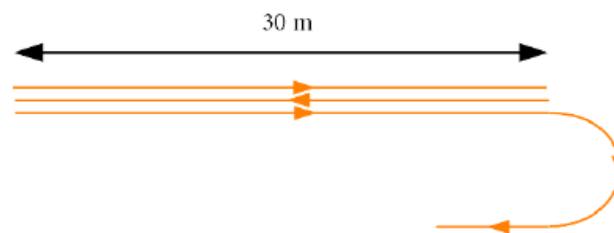


Figure 20: Manoeuvre à effectuer pour initialiser l'IMU [Positics]

Lors du lever nous avons porté notre attention sur le vol du drone, afin d'éviter de réaliser des lignes droites de plus de 800 m et ainsi minimiser la dérive de la centrale inertielle.

Lors du vol nous avons décidé de voler plus que nécessaire et de positionner le faisceau du lidar perpendiculairement aux lignes électriques pour avoir des résultats optimaux.

Lorsque le drone atterri, il faut faire attention aux led du lidar car elles indiquent l'état de la prise de donnée lors de l'acquisition (Voir Annexe 2).

## II.4 Traitement des données

### II.4.1 Traitement de la trajectoire

Une fois l'acquisition terminée, l'étape du post-traitement est primordiale. L'usage des différents logiciels est directement impacté par les composants du système en présence. Pour géoréférencer la trajectoire, nous utilisons le logiciel PosPac car nous sommes en présence d'une centrale IMU Applanix.

La centrale inertielle APX-20 est un système qui utilise une double IMU, intérieur et extérieur prenant des mesures à une fréquence de 200 Hz, ainsi qu'un capteur GNSS permettant d'utiliser les données GPS, GLONASS, BEIDOU, GALILEO, QZSS et SBAS.

Elle peut atteindre une précision de position de l'ordre de 2 à 5 cm en post-traitement et des précisions sur les angles de roulis, tangage de  $0.015^\circ$  et sur l'angle de lacet de  $0.035^\circ$ .

La centrale inertielle permet d'améliorer l'efficacité du levé par drone. Grâce à ses composants précis et le logiciel de post-traitement Pospac, elle élimine le besoin de prendre des points de contrôles, GCP.

Nous avons réalisé 3 levés différents dont 2 avec un plan de vol et 1 par pilotage manuel.

Une fois le levé terminé, nous avons transféré les données du Lidar sur une clé USB et obtenu les fichiers : .apx de la trajectoire brute, .TO4 de la trajectoire pour le post-traitement et .rxp de donnée laser brute.

Nous avons pu obtenir un fichier RINEX d'observation issu du pivot GNSS nécessaire au traitement de la trajectoire.

Une fois toutes ces données rassemblées, nous avons réalisé le traitement de la trajectoire sur le logiciel Pospac. Nous avons importé le fichier .TO4 représentant la trajectoire lors de l'acquisition du Lidar puis nous avons importé le fichier de données RINEX de notre base.

Ensuite, nous avons rentré les valeurs de notre bras de levier, du centre de l'antenne GNSS au centre du miroir du Lidar (Figure 21) (voir Annexe 2).



Figure 21: Bras de levier du Lidar

Nous avons réalisé le calcul de la trajectoire et obtenu un graphique de l'accélération avec des valeurs principalement inférieures à 0.1 g avec un maximum acceptable de 0.3 g hors pic (Figure 22). Les pics étant principalement dus aux accélérations de changements de trajectoire et d'initialisation au début et à la fin du levé. C'est une valeur à surveiller car une mauvaise valeur peut être due à un système d'amortissement défaillant pouvant apporter beaucoup de bruit dans le nuage sous le sol.

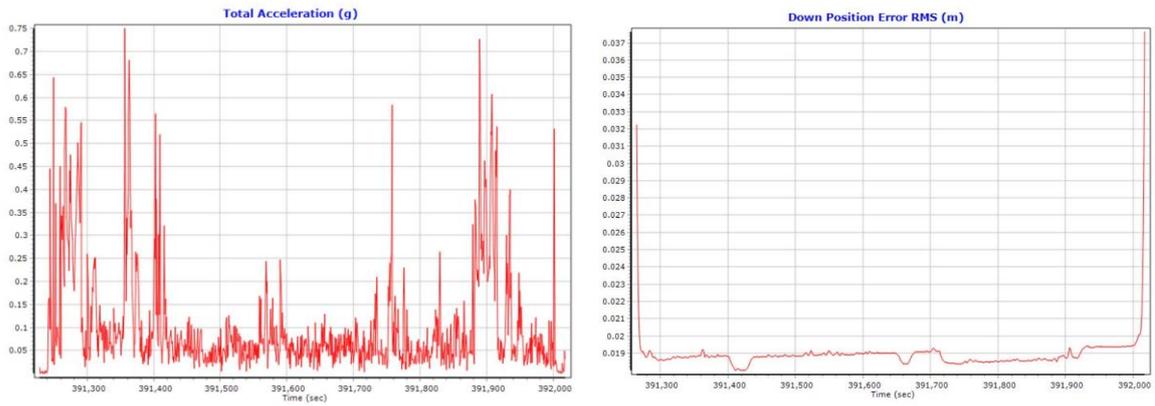


Figure 22: Accélération du drone (À Gauche) RMS sur la position verticale (À Droite)

Nous avons aussi obtenu les erreurs RMS sur les positions Nord, Est et Verticale, respectivement 0.93 cm, 0.97 cm et 1.86 cm (Figure 22 et 23). Les résultats sont tout à fait corrects apportant plus de précision comparée à un traitement avec une station du RGP où les erreurs RMS se rapprochent plus de 2 ou 3 centimètres.

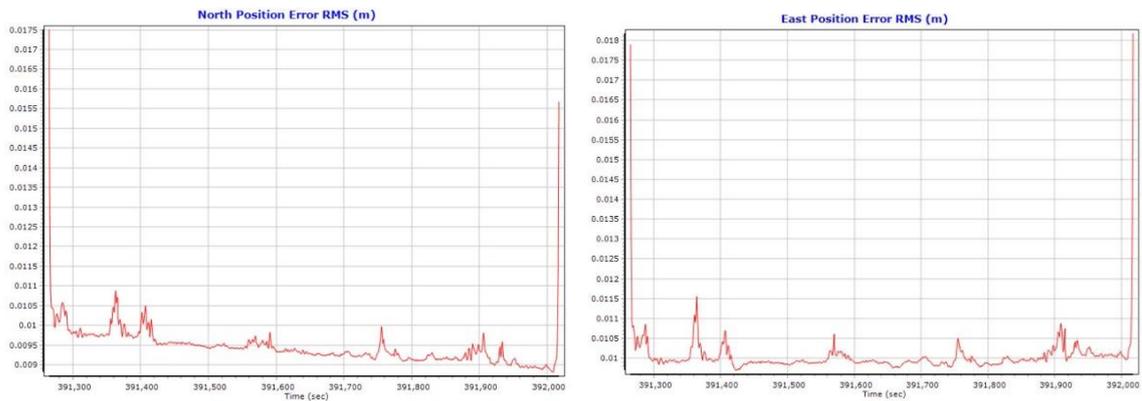


Figure 23: RMS sur la position Nord (À Gauche) RMS sur la position Est (À Droite)

Nous obtenons ainsi une trajectoire corrigée en vert (Figure 24).

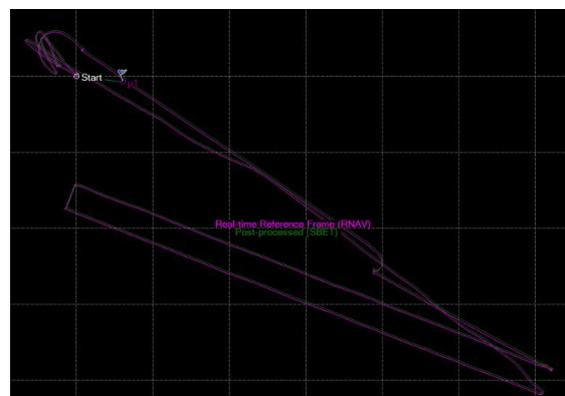


Figure 24: Trajectoire corrigée

Par la suite nous avons importé le fichier .apx de la trajectoire brute et le fichier SBET de la trajectoire corrigée issu de Pospac.

Il ne faut pas oublier de vérifier que l'on est dans le bon système de coordonnées via le code EPSG : 32631.

CloudStation permet d'exporter des mesures laser (2D) le long de la trajectoire 3D du capteur.

Le traitement suivant a permis de géoréférencer le nuage complet tout en supprimant les parties de levé inutiles comme l'initialisation de la centrale inertielle au début et à la fin du levé ainsi que le trajet pour parvenir au début du plan de vol (Figure 25 et 26).

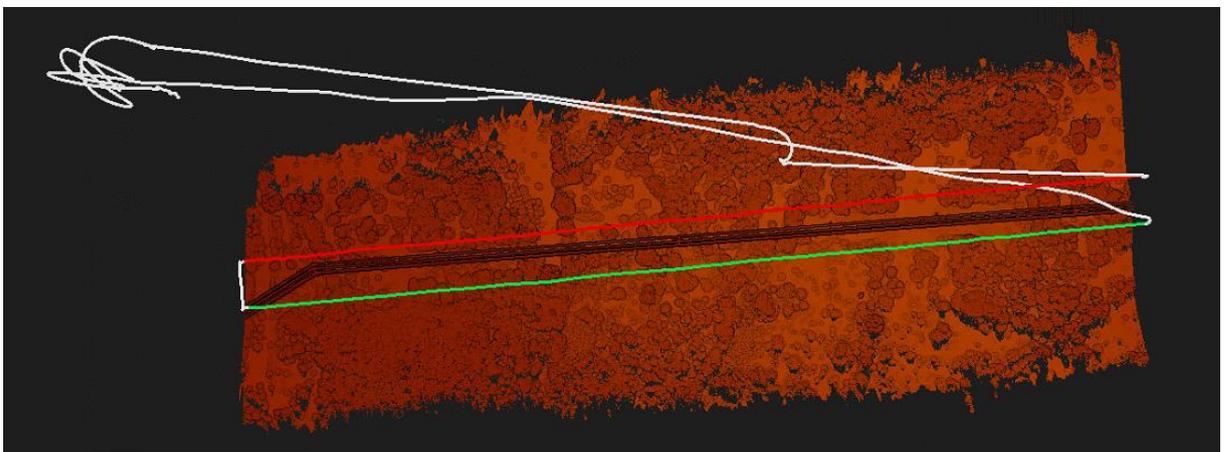


Figure 25 : Sélection de la trajectoire 3 à exporter

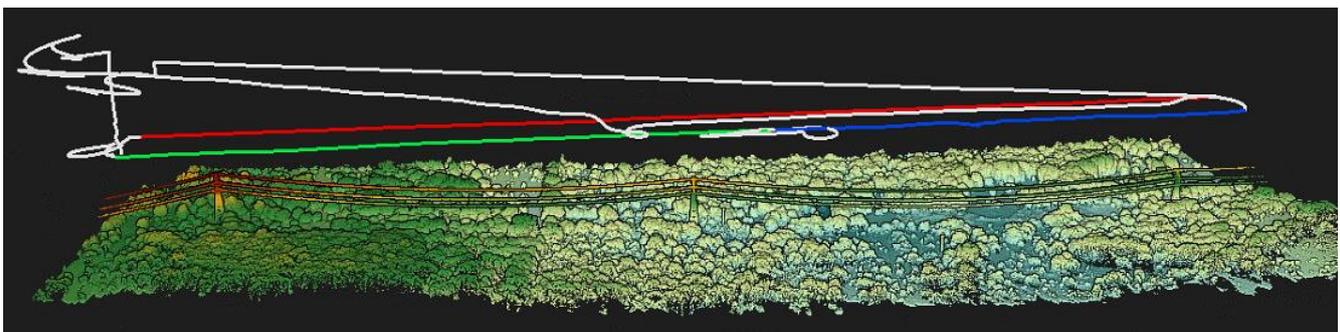


Figure 26: Sélection de la trajectoire 2 à exporter

À la suite de notre acquisition et des traitements de la trajectoire, nous obtenons un nuage de points géoréférencé. Nous avons rencontré certaines difficultés lors de l'acquisition et des traitements, car c'était une première pour l'entreprise. Nous allons ainsi, pouvoir mettre en œuvre différents traitements nous permettant de détecter les lignes électriques dans le nuage de points.

## II.4.2 Traitement du nuage de points

Au vu de l'offre pléthorique de logiciel de traitement Lidar, nous allons en étudier certains.

Nous allons nous baser sur différents critères comme la performance, la possibilité de supporter de gros nuages de points, la facilité d'accès pour la classification et segmentation. De plus, le logiciel doit être capable de lire les principaux formats de nuages de points (las, laz) et proposer l'export en dwg.

Enfin le logiciel doit être flexible pour pouvoir intégrer des programmes, macros, plug-in ou extension afin d'automatiser au maximum les tâches possibles pour diminuer le traitement et simplifier la manipulation des nuages de points.

Notre choix s'est porté sur 3 logiciels : Global Mapper, Lipowerline et Cyclone 3DR.

Les traitements qui suivent ont été effectués sur un ordinateur possédant un processeur Intel (R) Core (TM) i7-9700K CPU, 3.60 GHz, un système d'exploitation de 64 bits, 64 GO de mémoire vive et une carte graphique GTX 2060 Ti super.

Le nuage que nous allons traiter représente une ligne haute tension 90 kV, de 11 584 502 points avec une densité de l'ordre de 130 points / m<sup>2</sup>. Nous avons ainsi 1 point tous les 0.087 m. Le nuage s'étend sur une superficie de 0.35 km<sup>2</sup> (Figure 27).



Figure 27: Nuage de point suivant l'intensité [CloudCompare]

### II.4.2.1 Global Mapper

Global Mapper est un logiciel produit par Blue Marble Geographics. Le traitement des données Lidar est facilité par le développement d'un module spécial qui s'intègre dans le logiciel Global Mapper.



Ce module est accessible par une barre d'outils :



- La première icône permet de classifier le bruit
- La deuxième icône permet de classifier le sol
- La troisième icône permet de classifier les bâtiments et la végétation
- La quatrième icône permet de classifier les lignes et poteaux électriques
- La cinquième icône permet de vectoriser

Ce logiciel prend en compte un nombre impressionnant de formats de nuage de points.

Il peut exporter au format dwg, dxf, pts et xyz.

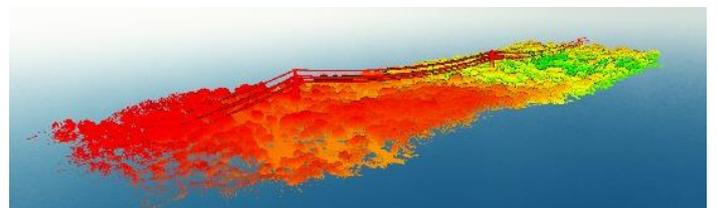
Global mapper peut supporter des nuages importants de l'ordre de 500 000 000 points.

Il existe, comme vu précédemment, des icônes permettant le calcul automatique des lignes électriques ou du sol, cependant, il est possible de créer ses propres scripts pour traiter de manière automatique les différents nuages de points.

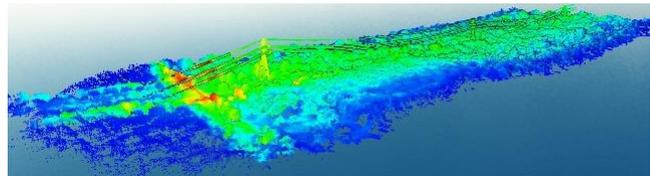
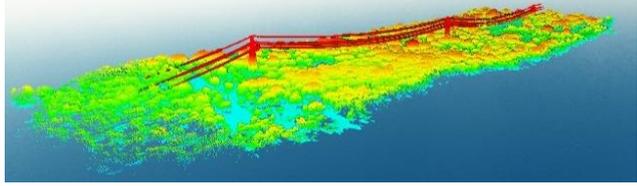
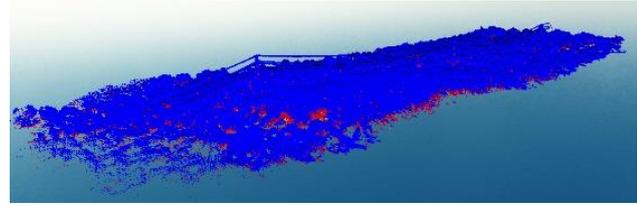
#### II.4.2.1.1 Processus pour la détection des lignes électriques

Plusieurs classifications sont implémentées dans le logiciel ainsi nous pouvons obtenir :

- Une classification selon l'altitude
- Une classification selon l'intensité



- Une classification selon le numéro de retour
- Une classification selon la hauteur au-dessus du sol
- Une classification selon la densité de points



Global Mapper est un logiciel qui doit réaliser une classification du sol pour pouvoir détecter de façon automatique les lignes électriques par un algorithme basé sur la hauteur des points au-dessus du sol.

Global Mapper utilise un algorithme MCC (Multiscale Curvature Classification) afin d'automatiser la classification du sol. L'algorithme utilise une approche itérative et multiscalaire pour évaluer les écarts entre les points et une courbure de surface moyenne dans le nuage de points.

L'algorithme de classification des lignes électriques compare les segments de points à des lignes, les plus justes possibles. Une fois cette opération réalisée, l'algorithme va classer les points en tant que lignes électriques s'ils se trouvent à une distance minimale d'une ligne détecté dans le nuage de points. Il est préférable d'utiliser cet algorithme sur des nuages de points de minimum 20 points / m<sup>2</sup>.

#### II.4.2.1.2 Résultat de la classification / segmentation

Pour classifier le sol et ensuite classifier les lignes électriques, il aura fallu 22 s de temps de calcul au logiciel (Figure 28).

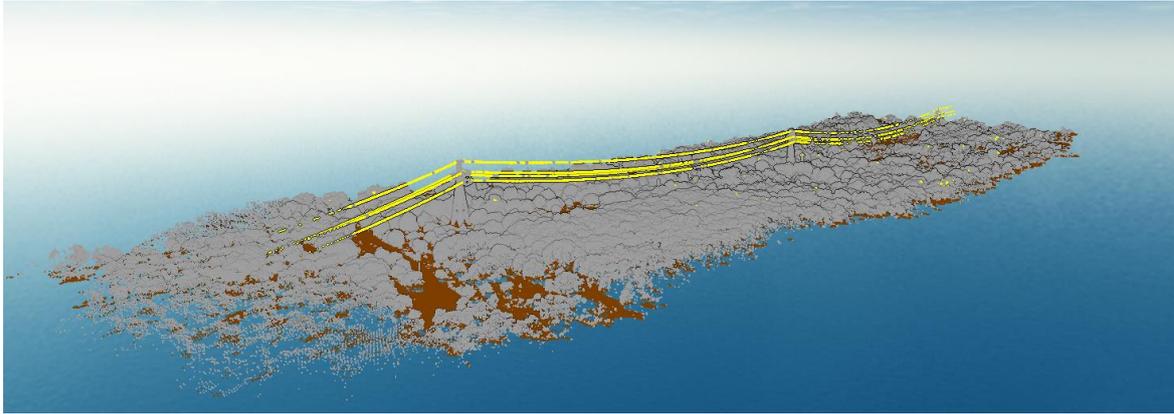


Figure 28: Classification du nuage de points de la ligne 90 kV issu de Global Mapper

Nous obtenons ainsi 3 couches de classification (Tableau 2) avec la répartition du nombre de points et le pourcentage dans le nuage. La première couche représente les points non classifiés qui apparaissent en gris, la seconde représente le sol en marron et la troisième représente les câbles électriques en jaune. Chaque classe est identifiée par sa valeur de classification issue du format las.

Classification	Nombre de point	%
0 - Created, never classified	6,303,952	54.42
2 - Ground	5,249,647	45.32
14 - Wire - Conductor (Phase)	30,903	0.27

Tableau 2: Répartition des points dans les différentes classes

La classification est plutôt optimale avec les paramètres rentrés, nous avons choisi 10 m comme hauteur minimale au-dessus du sol, représentant la moitié de la hauteur de nos lignes les plus basses car nos lignes électriques sont à plus de 20 m de hauteur (Voir Annexe 3). La coupe du nuage nous permet de constater que tous les points de la ligne sont pris en compte dans la bonne couche de classification ainsi que le sol (Figure 29).

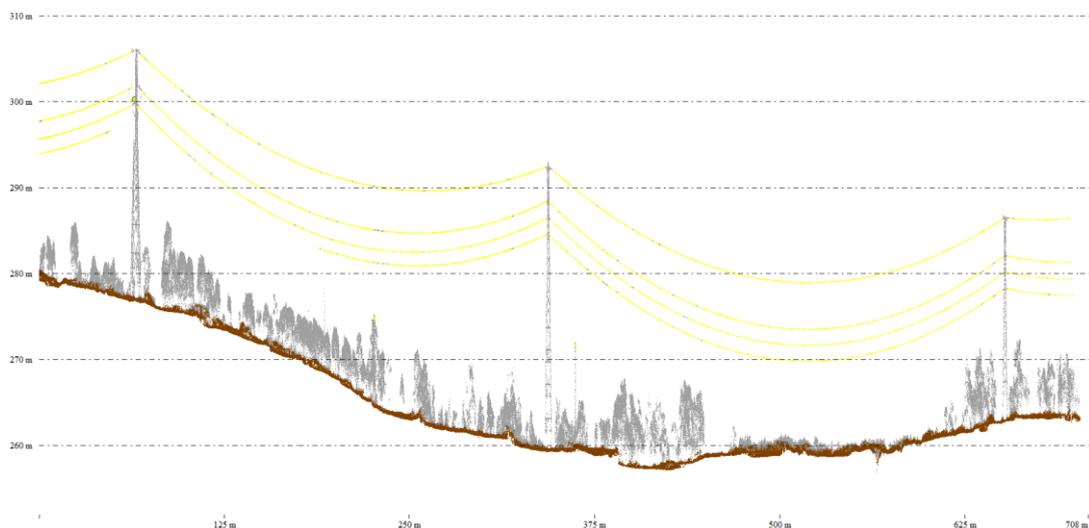


Figure 29: Coupe du nuage classifié de la ligne 90 kV sous Global Mapper

Ensuite, nous avons réalisé une classification sur un nuage de points représentant des lignes électriques de courbures et hauteur différentes (Figure 42). Nous avons pris une hauteur de 5 m, inférieure de moitié à la ligne la plus basse. L'association de détection de lignes électriques à différentes hauteurs n'est pas une gêne pour le logiciel qui ne réalise que peu d'erreur de classification. Le résultat de la classification est satisfaisant, cependant, avec les écarts de hauteur entre les lignes, des erreurs de classifications se multiplient.

Dans un troisième temps, nous avons classifié une ligne de 90 kV en un seul passage avec une densité de 53 points/ m<sup>2</sup> en 8 s. Nous obtenons des résultats probants attestant de la non nécessité d'un aller-retour pour obtenir des données correctement exploitables.

Enfin, nous avons classifié une ligne de 20 kV en un seul passage avec une densité de 80 points/ m<sup>2</sup> en 4 s (Figure 30).

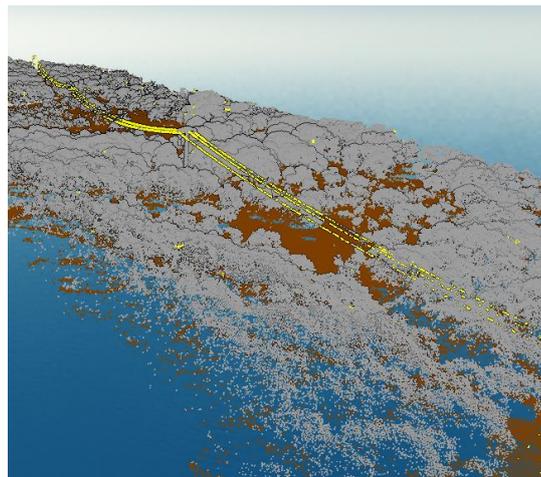


Figure 30: Classification du nuage de points de la ligne 20 kV sous Global mapper

La classification est correcte avec les paramètres rentrés, nous avons choisi 5 m comme hauteur minimale au-dessus du sol, représentant la moitié de la hauteur de nos lignes les plus basses car nos lignes électriques sont à plus de 10 m de hauteur. Sur la coupe de cette ligne électrique, nous pouvons constater que les classes sont respectées et qu'il y a plus d'erreurs de classification que dans la ligne de 90 kV.

La coupe du nuage (Figure 31) nous permet d'apprécier la différence de courbure entre la ligne 90 kV ( Figure 29) et la ligne 20 kV. Le logiciel classifie facilement les petites lignes électriques ainsi que le sol sans trop d'erreur de classifications.

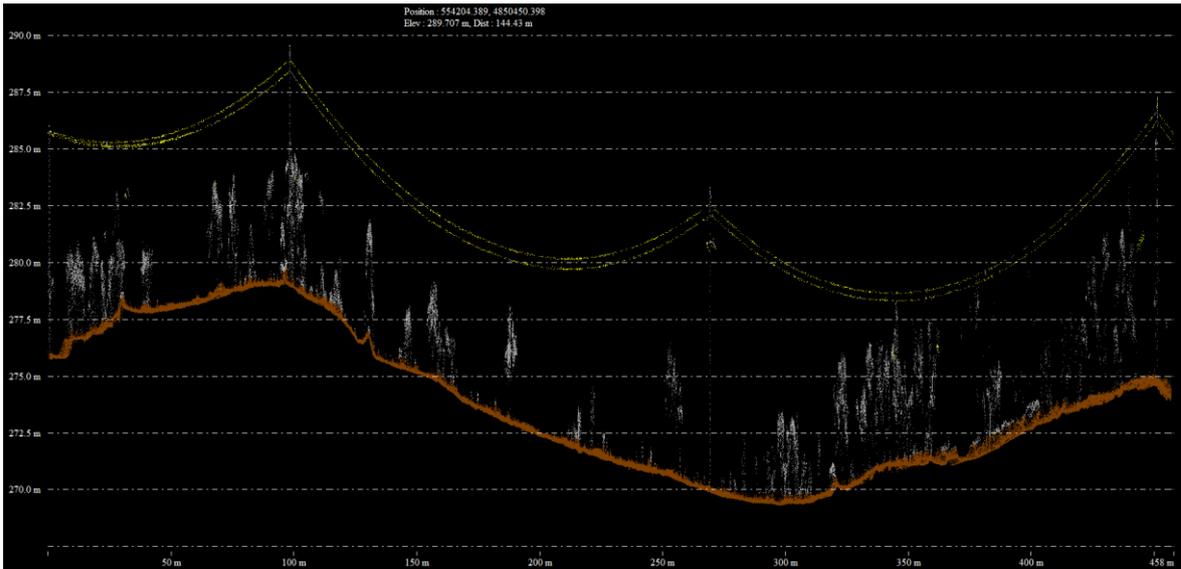


Figure 31: Coupe du nuage de la ligne 20 kV sous Global Mapper

#### II.4.2.1.3 Avantages et inconvénients

Global Mapper est un logiciel complet au vu de sa diversité d'outils. La barre d'outils de classification automatique facilite grandement les traitements. De plus, la visualisation 3D s'effectue sur une fenêtre à part, permettant une visualisation en temps réel des différents traitements. Ce visualisateur est assez fluide et intuitif, quel que soit le volume de données.

Un autre avantage est la possibilité de modifier les paramètres de classification automatique et d'adapter ainsi les algorithmes aux différentes scènes traitées. Le logiciel permet de créer ses propres scripts afin de traiter des nuages entièrement.

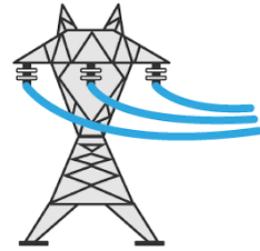
Cependant, le logiciel ne fait pas la différence entre un câble de blindage et un câble électrique, mais permet de traiter tous types de lignes électriques 90 kV et 20 kV.

Ces résultats sont très appréciables car il est possible de traiter des lignes hétéroclites sans pour autant modifier les paramètres pour la détection de ces lignes électriques.

De plus comme nous avons pu le voir, un seul passage est suffisant pour obtenir des résultats probants augmentant ainsi la rapidité de prise de données sur le terrain.

## II.4.2.2 Le logiciel Lipowerline

Lipowerline est un logiciel produit par GreenValley International. C'est un logiciel spécifique à la détection des lignes électriques et leurs abords, faisant partie de la suite Lidar360.



Ce logiciel peut prendre en compte des nuages de points au format hébergeur LiData, Las et ASCII, des images au format TIFF, des rasters, des vecteurs et des tables.

Il peut exporter au format xyz et pts.

Ce logiciel peut supporter des nuages importants de l'ordre de 500 000 000 de points.

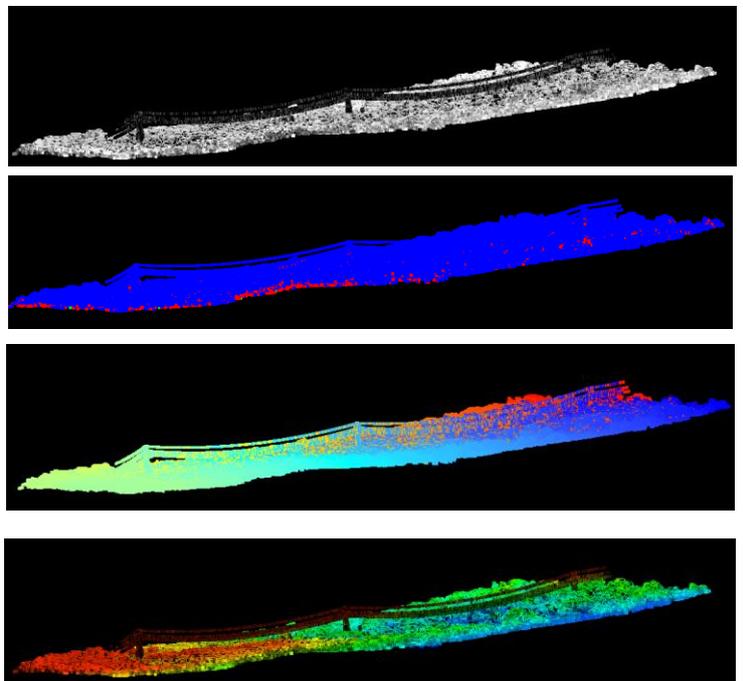


Cette icône permet de classier automatiquement les lignes électriques, les fils de blindages ainsi que les pylônes.

### II.4.2.2.1 Processus pour la détection des lignes électriques

Plusieurs classifications sont implémentées dans le logiciel ainsi nous pouvons obtenir :

- Une classification selon l'intensité
- Une classification selon les retours
- Une classification selon le temps
- Une classification selon un mélange



LiPowerline, utilise un algorithme TIN afin d'automatiser la classification du sol. L'algorithme ajoute le point à la ligne si la distance et l'angle entre le point et le triangle atteignent le seuil voulu.

Ensuite, le logiciel utilise des algorithmes de Machine Learning pour classer automatiquement les lignes électriques et les pylônes, ce qui fait considérablement progresser le processus de modélisation.

Avant la classification automatique, le dessinateur doit générer manuellement des échantillons de formation de lignes électriques pour une utilisation ultérieure par Machine Learning. Au moins une travée complète (entre deux pylônes) est requise pour l'échantillon de formation.



Pour pouvoir réaliser la détection automatique des lignes électriques, nous devons dans un premier temps indiquer la position des différents pylônes et leur affecter un type : Tour de tension ou Tour en ligne droite.

Pour réaliser la classification le logiciel doit couper le nuage en n-1 travées (n représente le nombre de pylônes). L'algorithme doit évoluer dans une travée complète (entre 2 pylônes) afin d'avoir un début et une fin définie pour réaliser la détection.

#### II.4.2.2.2 Résultat de la classification / segmentation

Pour classier le sol et ensuite classier les lignes électriques, les pylônes et le câble de blindage, il aura fallu 81 s de temps de calcul au logiciel (Figure 32) (Voir Annexe 4).

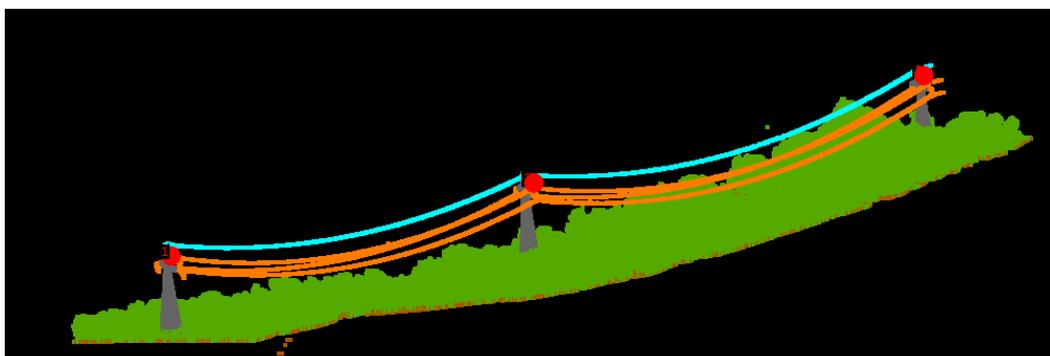


Figure 32: Nuage de la ligne 90 kV issu de Lipowerline

Les pylônes sélectionnés dans un premier temps sont matérialisés par des sphères rouges sur le nuage de points (Figure 33).

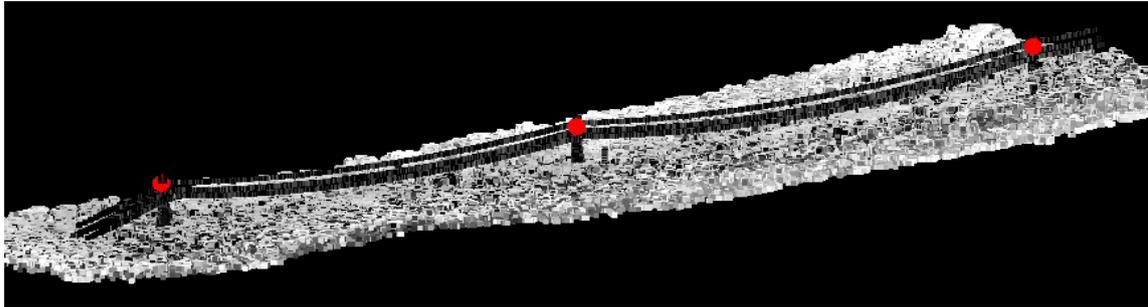


Figure 33: Sélection des pylônes sous Lipowerline

Nous obtenons ainsi 6 classes avec la répartition du nombre de points et le pourcentage dans le nuage de points suivant chaque travée (Tableau 3 et 4). La première couche représente les points non classifiés qui apparaissent en vert, la seconde représente le sol en marron, la troisième représente les points bas, la quatrième représente les câbles électriques en orange, la cinquième représente les pylônes en gris et la sixième représente les câbles de blindage en cyan. Chaque classe est identifiée par sa valeur de classification issue du format las.

	Classification Name	Value	Points Count
1	Never Classified	0	4090858
2	Ground	2	635613
3	Noise	7	1595
4	Conductor	16	10488
5	Structure	17	10431
6	Shield Wire	20	3766

Tableau 3: Répartition des points dans la travée 1

Nous obtenons ainsi une coupe de la travée 1 (Figure 34) représentant la distance entre les 2 pylônes ainsi que les fils électriques avec le fil de blindage et les pylônes. Nous pouvons constater que le logiciel opère une différence de classement sans erreurs de classifications apparentes.

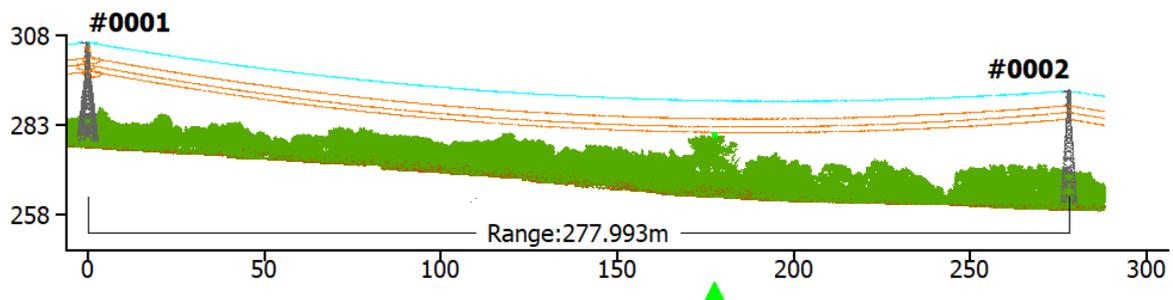


Figure 34: Coupe de la travée entre le pylône 1 et 2 sous Lipowerline

	Classification Name	Value	Points Count
1	Never Classified	0	4306000
2	Ground	2	652247
3	Noise	7	1807
4	Conductor	16	7964
5	Structure	17	5309
6	Shield Wire	20	3116

Tableau 4: Répartition des points dans la travée 2

La travée 2 (Figure 35) est plus importante que la travée 1 mais ne comporte pas de points dangereux. La classification est optimale même avec une végétation proche des câbles électriques.

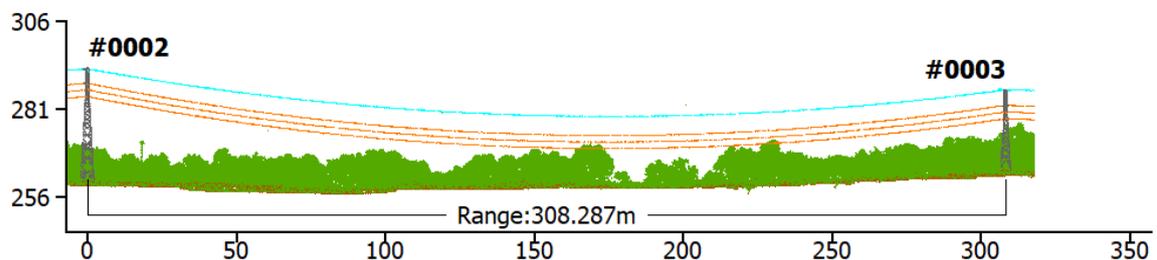


Figure 35: Coupe de la travée entre le pylône 2 et 3 sous Lipowerline

Nous avons de bons résultats avec la classification par Machine Learning proposée par le logiciel.

Nous avons ensuite réalisé une classification sur un nuage de points représentant des lignes électriques de courbures et hauteurs différentes. Le résultat n'est pas de bonne qualité, le logiciel n'arrive pas à identifier les différentes lignes électriques. Il confond les câbles de blindages et les câbles des lignes électriques.

Dans un second temps, nous avons traité le nuage de points d'une ligne de 20 kV (Figure 36) et lors de l'import nous avons pris la catégorie de ligne la plus petite possible, 220 kV. Nous n'avons pas obtenu de résultats probants, par la suite nous avons créé une nouvelle catégorie de ligne 20 kV avec de nouveaux échantillons d'apprentissage. Les résultats se sont améliorés avec les nouveaux paramètres implémentés, cependant la confusion entre les câbles électriques et de blindage persiste.

Nous pouvons expliquer ces difficultés de traitement par la provenance du logiciel qui est américain. La courbure des lignes et leurs dimensionnements n'est pas le même qu'en France. Malgré la répétition d'échantillons d'apprentissage, nous n'avons pas réussi à distinguer les lignes électriques de la classe du fil de blindage inexistant sur celles-ci.

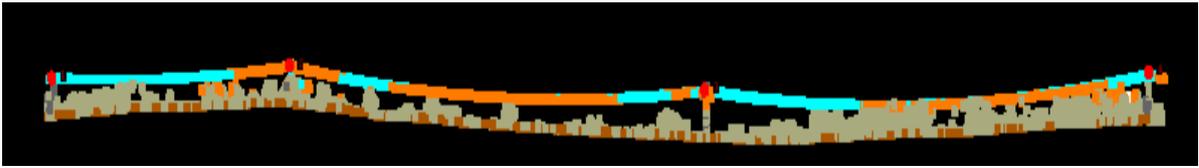


Figure 36: Coupe du nuage de la ligne de 20 kV sous Lipowerline

Dans un troisième temps, nous avons réalisé le traitement d'une ligne de 90 kV en un seul passage en 68 s (Figure 37). Le traitement apporte des résultats satisfaisant avec un temps de traitement légèrement plus faible que la ligne électrique de 90 kV en 2 passages.

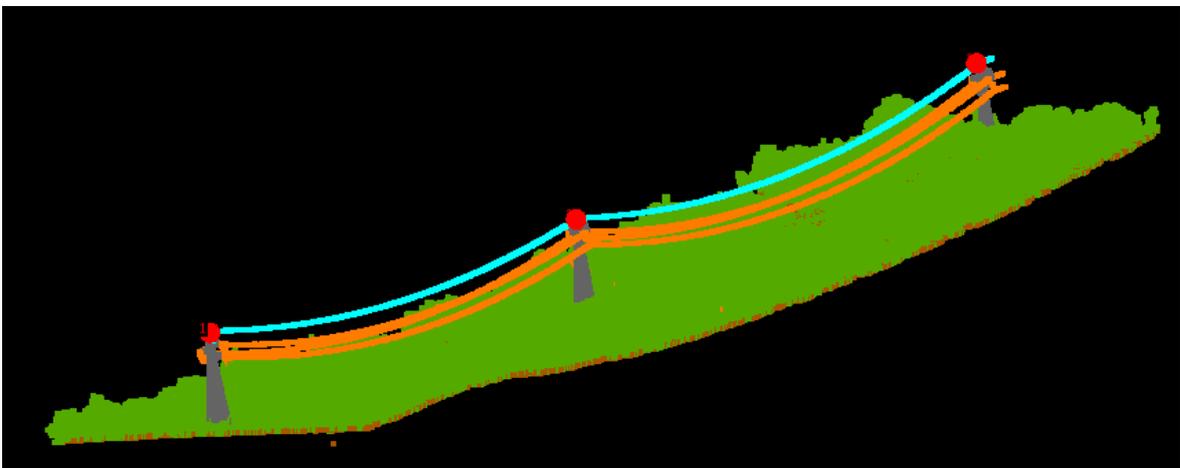


Figure 37: Ligne électrique 90 kV un passage issu de Lipowerline

#### II.4.2.2.3 Avantages et inconvénients



Ce logiciel contient aussi un algorithme permettant de classier les points des arbres qui sont à une certaine distance des câbles électriques, nous avons ainsi pris une distance de danger de 5 m et trouvé 1 endroit où la végétation peut poser un problème (Figure 38). Nous pouvons voir cet arbre sur la figure 34 indiqué par une flèche verte.

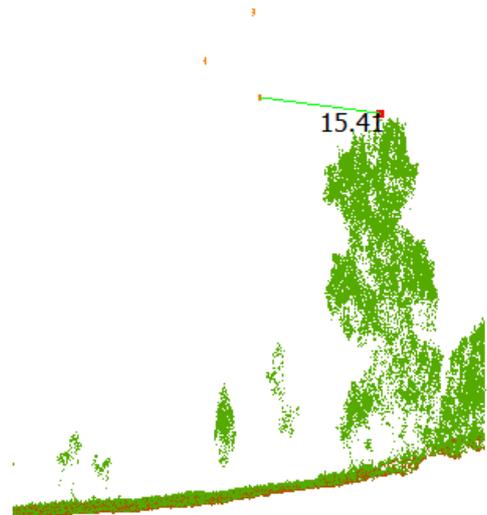
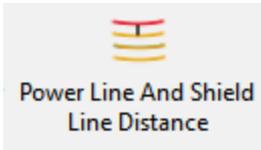


Figure 38: Arbre proche des lignes électriques



Un autre algorithme permet la prédiction de la pousse des arbres de 0.3 m par an exposant 3 résultats dangereux. Cet algorithme se base sur une classification de la hauteur des points au-dessus du sol.



Un autre algorithme permet d'estimer la distance entre le câble de blindage et les câbles électriques où nous avons eu 2 résultats pour une distance inférieure à 5 m.

Lipowerline, est un logiciel complet et intuitif spécifique à la détection des lignes électriques. Les outils présents dans le logiciel permettent un traitement simplifié des données Lidar, mais aussi plus poussé grâce au plug-in implémenté.

Il est possible de couper le nuage autour de la ligne électrique lorsque l'on a indiqué la localisation des différents pylônes pour avoir une meilleure visualisation de celle-ci.

Un autre avantage est la possibilité de modifier les paramètres de classification automatique et d'adapter ainsi les algorithmes aux différentes scènes et lignes traitées.

Cependant, il n'est pas possible de créer ses propres scripts afin de traiter des nuages de points plus rapidement.

Néanmoins, le logiciel réalise la différence entre un câble de blindage et un câble électrique. Cependant le logiciel a de grande difficulté à traiter un nuage de points avec des lignes électriques de hauteurs, compositions et courbures différentes. De plus les lignes de 20 kV sont mal classifiées car le logiciel confond le câble de blindage et les câbles électriques. Cependant comme nous avons pu le voir, un seul passage est suffisant pour obtenir des résultats probants augmentant ainsi la rapidité de prise de données sur le terrain.

De plus, avec une utilisation plus poussée et un éventail plus important d'échantillons d'apprentissage ce problème de classification pourrait être résolu.

### II.4.2.3 Cyclone 3DR

Cyclone 3DR est une extension récente intégrée à Cyclone, produit par Leica Geosystems. C'est l'association de 3D Reshaper et de la technologie JetStream.



Figure 39 : Ancien logo 3DReshaper et nouveau logo de Cyclone 3DR

Ce logiciel, prend en compte un nombre impressionnant de formats de nuage de points du format las au format natif Leica, Faro, Riegl ou encore Zoller et Fröhlich en passant par du TIFF ou encore par du dwg.

Il permet d'exporter en dxf, e57, pts, ptx et xyz.

Cyclone 3DR peut supporter des nuages assez importants de l'ordre de 500 000 000 points ou plus.

#### II.4.2.3.1 Processus pour la détection des lignes électriques

Le logiciel permet d'implémenter différents scripts, qui doivent être écrits en langage JavaScript, dont un qui est déjà présent pour l'extraction des lignes électriques.

Pour que ce script fonctionne il faut sélectionner dans un premier temps le nuage de point, puis réaliser un clic sur la ligne que l'on souhaite extraire.

Le script utilise un algorithme de croissance de régions par détection semi-automatique.

Ce script fonctionne très bien pour les nuages ayant une densité de points élevée, supérieure à 10 000 points par m<sup>2</sup> pour notre exemple, cependant pour les nuages moins denses, de l'ordre de 100 points par m<sup>2</sup>, le pas d'échantillonnage de 0.5 n'est pas assez élevé. Un pas d'échantillonnage de 2 est plus adéquat, cependant des erreurs persistent.

Nous avons implémenté un second script qui s'appuie, comme le premier, sur la sélection du nuage de points suivi d'un clic de la part du dessinateur sur la ligne à extraire.

Pour la détection, il se base sur des fonctions de distance entre les points dans le nuage et dans la ligne sélectionnée. Cela permet d'extraire le premier segment de la ligne. Il initialise la ligne dans le nuage de points et crée une sphère définissant la zone dans le nuage où nous allons extraire le segment.

Ensuite, nous extrayons des parties du nuage répondant aux critères du point, qui doit être cliqué sur la ligne, et au critère d'emprise de la sphère. Seul le nuage dans la sphère est pris

en compte et la détection de la meilleure ligne est réalisée avec les points de la sphère. Pour détecter cette ligne, l'algorithme part du point cliqué et cherche un segment dans un cône. Pour détecter d'autres lignes, l'algorithme crée un cône avec la direction de la ligne précédemment détecté. Pour qu'il puisse détecter une ligne dans ce cône, il doit y avoir un nombre de points supérieur ou égal à 5. Lorsque l'on clique sur la ligne, l'algorithme va chercher à créer une ligne d'un côté et s'il n'y arrive pas, il va chercher à créer une ligne de l'autre côté en repartant du point de départ cliqué par le dessinateur. Il faut faire attention de sélectionner un seul nuage avant de lancer le script et entrer un pas d'échantillonnage en adéquation avec le nuage.

#### II.4.2.3.2 Résultat de la classification / segmentation

Pour l'extraction des lignes électriques, il aura fallu 3 s de temps de calcul au logiciel pour le premier algorithme et 8 s de temps de calcul au logiciel pour le second algorithme (Figure 40).

Nous n'avons pas accès à la répartition du nombre de points et le pourcentage de ceux-ci bien classés.

Nous obtenons de bons résultats d'extraction des lignes électriques pour le nuage de points de la ligne de 90 kV. C'est le nuage le plus dense de notre acquisition. La détection de la ligne ne fait pas d'erreur de classification, dès que l'algorithme n'arrive plus à avancer sur la ligne il s'arrête. Il nécessite à nouveau l'intervention du dessinateur pour cliquer sur la ligne à détecter.

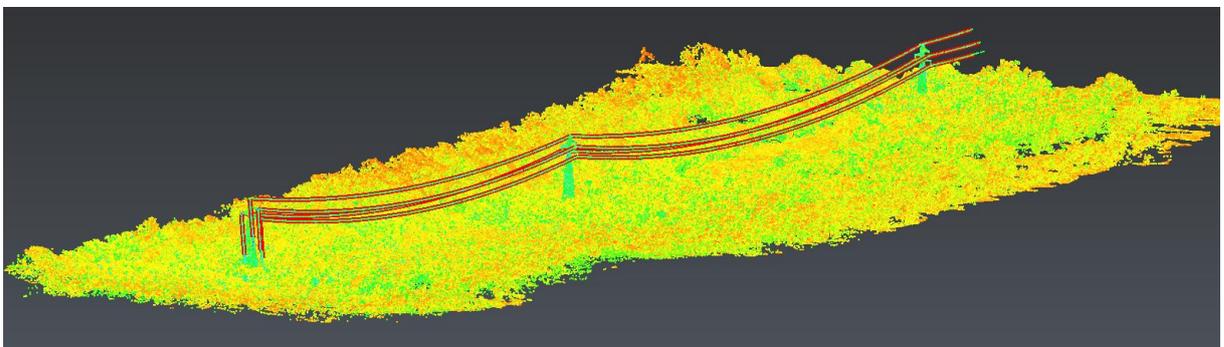


Figure 40: Classification du nuage de point issu de Cyclone3DR

Dans un second temps, nous avons réalisé une classification sur un nuage de points représentant des lignes électriques de courbures et hauteurs différentes. Le logiciel montre des difficultés à détecter les différentes lignes car le nuage n'est pas suffisamment dense. Des erreurs de classifications surviennent et le script détecte des lignes électriques dans la végétation.

Cette difficulté est retrouvée lorsque l'on traite la ligne électrique de 20 kV. Le logiciel réalise la détection des lignes de manière satisfaisante lorsque peu de végétation est présente aux abords de la ligne, dès que cette végétation est présente, des erreurs de vectorisation se développent. Nous retrouvons également cette difficulté avec la ligne de 90 kV en un seul passage qui présente une densité de points trop faible pour permettre une bonne détection des lignes électriques.

#### **II.4.2.3.3 Avantages et inconvénients**

Ce logiciel est très répandu dans les cabinets de géomètres, l'une de ses spécificités, issue de 3D Reshaper, est la possibilité de créer ses propres fonctions afin d'automatiser le traitement des données en utilisant le langage JavaScript. Lors de ce traitement nous avons mis en avant que le premier script présente des difficultés à classifier semi-automatiquement les nuages de points peu denses.

Cependant, le second script obtient des résultats convaincants de classification de nuage de points de Lidar aéroporté, que le nuage soit de densité faible ou élevée.

Néanmoins, les résultats se détériorent lorsque l'on souhaite traiter un nuage de points de plusieurs lignes électriques distinctes ou des nuages avec une densité de points de l'ordre de 50 points par m<sup>2</sup>.

Nous pouvons expliquer ce problème par la destination de ce logiciel qui a été conçu pour l'exploitation de nuage de points issus de scanner statique ou dynamique possédant une densité de point bien plus élevée que celle des nuages de lidar.

### II.4.3 Logiciel répondant le mieux à notre problématique

Pour répondre à notre problématique de détection des lignes électriques dans le nuage de points du Lidar aéroporté, les trois logiciels testés donnent des résultats satisfaisants tout en utilisant des algorithmes de classification / segmentation différents.

Chaque logiciel possède des avantages et des inconvénients :

- Le logiciel le plus rapide est Cyclone 3DR suivi de Global Mapper et enfin Lipowerline qui est 3 fois moins rapide que les autres ;
- Au niveau de la classification des points, Lipowerline est le plus efficace, car il classe également le sol, la structure des pylônes et le câble de blindage en plus des câbles électriques. Global Mapper classe également le sol mais ne fait pas la différence entre un câble électrique et le câble de blindage. Cyclone 3DR ne fait quant à lui qu'extraire les lignes électriques. C'est au dessinateur de différencier les câbles électriques du câble de blindage ;
- Nous avons également réalisé des tests sur un nuage de points de ligne électrique de 20 kV concluant pour les logiciels Global Mapper et acceptable pour Cyclone 3DR, cependant Lipowerline présente des difficultés pour détecter cette ligne électrique ;
- Nous avons aussi réalisé le traitement d'un nuage de points incluant plusieurs types de lignes électriques avec des courbures, hauteurs et compositions différentes. Global Mapper est le logiciel qui réussit le mieux à détecter les différents types de lignes électriques avec des erreurs de classifications. Cyclone 3DR peut détecter ces différents types de lignes électriques avec plus d'erreur que le Global Mapper et le logiciel Lipowerline ne permet pas une détection réaliste de ces lignes avec un nombre d'erreurs de classifications conséquent.
- Nous avons également testé le traitement du nuage de points de la ligne 90 kV en un seul passage, Global mapper est le logiciel qui réussit le mieux la classification suivie de Lipowerline et Cyclone 3DR montre des difficultés dans de traitement dû à la faible densité de ce nuage de points.

En outre les logiciels sont capables de réaliser le traitement et détecter les lignes électriques avec un seul passage du drone permettant un gain de temps non négligeable.

Nous pouvons comparer les différents atouts et limites des logiciels dans le tableau 5.

Critères / logiciels	Global Mapper	Lipowerline	Cyclone 3DR
Format d'import	+++	+	++
Format d'export	+++	+	++
Support de gros nuage	++	+	+++
Temps de traitement	++	++	++
Créer ses propres scripts	++	+	+++
Différentes classifications	+++	++	-
Jouer sur les paramètres de classification / segmentation	++	++	+++
Classification des différents types de ligne électrique	+++	+	+
Détection des câbles de blindages	-	+++	+
Détection des pylônes électriques	-	+++	-
Prix	+++	++	+
Total	21	19	16

Tableau 5: Récapitulatifs des avantages et inconvénients des logiciels

### III Discussion et résultats

#### III.1 Difficultés rencontrées

La location du matériel fut compliquée, car il y avait peu d'offres de location pour les outils nécessaires à notre acquisition. Etant proches des locaux de YellowScan, nous pensions trouver la solution idéale cependant ils ne réalisaient pas de location de matériel. Nous sommes donc passés par l'intermédiaire de Positics, Paris, pour la location du Lidar et Shop Faune, Rennes, pour la location du drone Dji Matrice 600 PRO. Le drone Matrice 300 PRO était introuvable à la location. Ce drone est plus récent, plus maniable et plus léger que le matrice 600. De plus, des fixations rapides sont présentes pour faciliter le montage des différents équipements comme le lidar.

Lors de l'acquisition, comme le matériel ne nous appartenait pas et qu'il s'agissait une première pour le cabinet, nous avons dû prévoir un temps de formation vis-à-vis de ce nouveau matériel.

Nous n'avons pas eu de problème météorologique impactant notre levé cependant c'est un paramètre à prendre en compte lors des campagnes de levé futures.

Pour la partie trajectoire automatique, nous nous sommes appuyés sur DJI GROUND STATION PRO pour réaliser des vols automatiques afin d'éviter l'obtention de données avec des précisions disparates lors de vol manuel.

Lors du traitement, nous avons eu l'appui de Positics, loueur du capteur Lidar, pour réaliser les différents traitements sur PosPac et CloudStation. Nous n'avons pas eu de difficulté importante pour réaliser le géoréférencement de la trajectoire. Le seul souci fut un problème de licence CloudStation qui ne nous a pas permis de réaliser nos traitements immédiatement à la suite de notre levé et ainsi pouvoir nous contrôler sur le terrain par une visualisation du nuage de points.

Ensuite, la difficulté principale lors des traitements de nuage de points a été le choix des logiciels dans l'offre pléthorique du marché du traitement de nuage de points. Une autre difficulté fut l'obtention des différentes licences nécessaires au fonctionnement des outils spécifiques à la détection des lignes électriques. Après avoir obtenu les différents logiciels, il nous a fallu un temps d'adaptation et de recherche pour se familiariser avec ceux-ci et intégrer des routines de traitements propres aux lignes électriques. Une fois les logiciels maîtrisés, il a fallu comprendre les différents algorithmes de traitement ainsi que le fonctionnement des routines des logiciels dans la détection automatique et semi-automatique des lignes électriques pour les adapter à notre objectif.

### **III.2 Comparaison de système d'inspections**

Dans cette partie, nous allons comparer trois systèmes utilisés pour les mesures des lignes électriques :

- L'inspection par hélicoptère
- L'inspection par voie pédestre
- L'inspection par Lidar YellowScan VX-20 aéroportée par un drone DJI M600 PRO

Ces trois méthodes de levé ont des temps de mise en œuvre très différents, la méthode pédestre présente une mise en œuvre immédiate, il faut un temps plus important pour l'hélicoptère et un temps encore plus important pour le lidar aéroporté.

Le temps d'acquisition diffère largement, car l'hélicoptère est limité par son autonomie comme le drone alors que la méthode pédestre possède un temps d'acquisition limité seulement par le temps.

La méthode pédestre est grandement influencée par le terrain qui peut être inaccessible alors que pour les méthodes par drone et hélicoptère cet inconvénient n'existe pas.

Une différenciation importante aussi est la vitesse de levé, car l'hélicoptère réalise des inspections à une vitesse de l'ordre de 50 à 60 km/h alors que le drone réalise les inspections à une vitesse de 18 km/h. La méthode pédestre quant à elle, évolue à une vitesse de l'ordre de 5 km/h.

Le coût économique n'est pas le même non plus, pour la méthode pédestre une seule personne suffit, comme pour le Lidar aéroporté, alors que l'hélicoptère amène des coûts plus importants avec la location de l'hélicoptère et du pilote ainsi que la personne qui réalise l'inspection à vue.

### **III.3 Analyse des résultats**

Après les traitements sous PosPac et CloudStation, nous obtenons des résultats de nuage brut suffisamment dense pour arriver à percevoir les lignes électriques sans classification. C'est un premier signe encourageant pour la détection des lignes électriques dans le nuage de points.

Nous avons pu constater qu'il valait mieux privilégier le géoréférencement en post-traitement avec l'utilisation d'un pivot GNSS placé au centre de la scène vis-à-vis d'une station du RGP. Les précisions RMS sur les positions sont améliorées par un facteur double entre ces deux outils.

Nous pouvons comparer le nuage de points acquis de différentes manières et ainsi avoir un aperçu de l'efficacité de la méthode de levé par lidar aéroporté.

Nous pouvons constater que le nuage de points du lidar aéroporté est bien moins dense que ceux des scanners statiques et apporte ainsi une précision plus faible dans la détection des lignes électriques.

Par exemple dans le nuage du Lidar nous ne pouvons pas distinguer les isolants électriques et ainsi déterminer leurs états, alors que dans les nuages des scanners nous obtenons un rendu satisfaisant. Un nuage plus dense est plus facilement exploitable qu'un nuage moins dense pour ce type de détail (Figure 41).

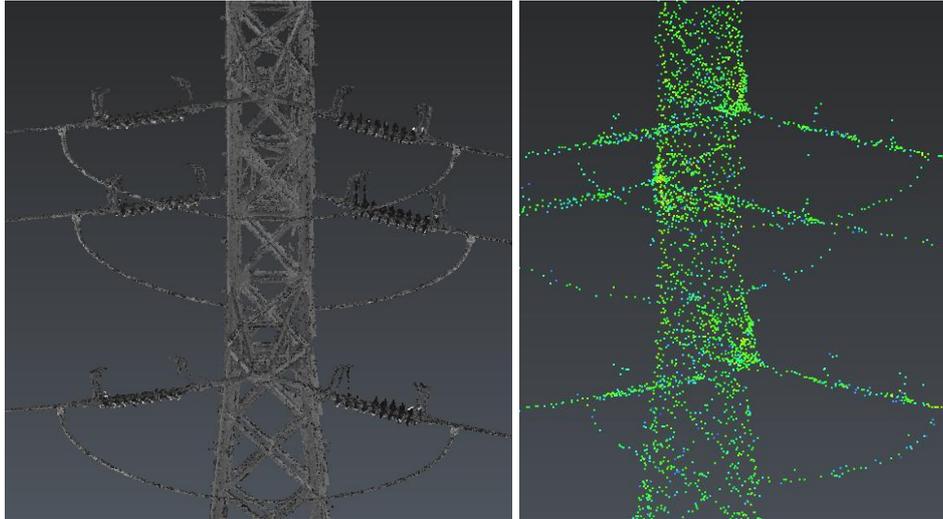


Figure 41: Isolant issu du RTC 360 (À Gauche) Isolant issu du Lidar (À Droite) [Source personnel]

De surcroît les résultats obtenus par scanner statique sont plus précis et permettent sous Cyclone 3DR une extraction simplifiée (Figure 42) comparée à Lipowerline qui est le logiciel qui a le plus de mal à traiter ces nuages denses. Le logiciel Global Mapper est quant à lui plus lent que Cyclone 3DR pour ces nuages de points mais réalise un traitement satisfaisant de ces données (Voir Annexe 5).

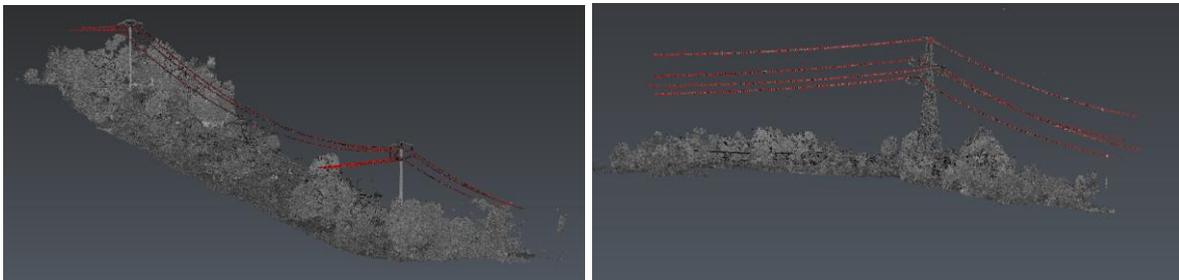


Figure 42: Nuage du scanner sous Cyclone 3DR

Le relevé par lidar aéroporté permet une acquisition rapide de données sur de vastes surfaces, un seul passage au drone est suffisant pour acquérir un maximum de données. En 12 min nous avons réalisé l'acquisition de différents types de lignes électriques sur une surface de plus de 30 ha (Figure 43).

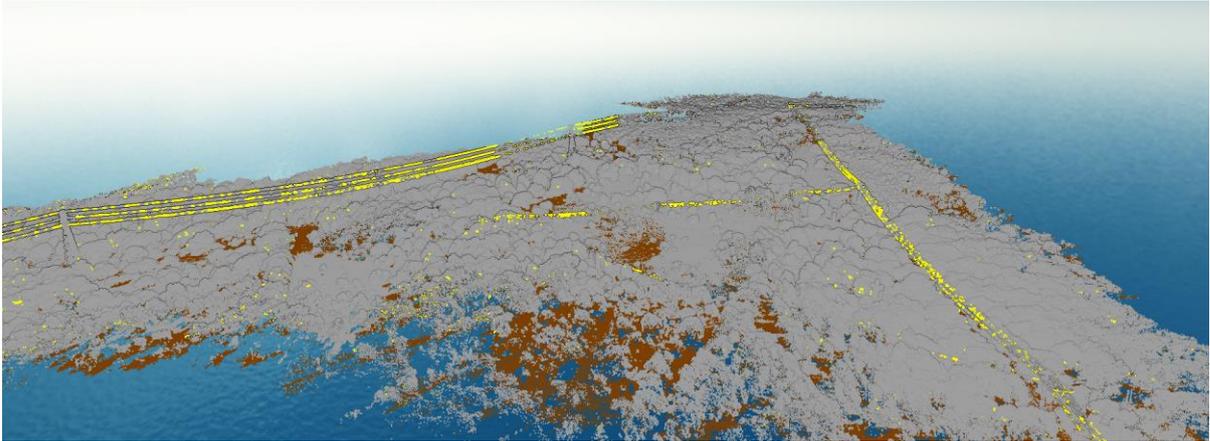


Figure 43: Nuage de point global de la zone classifié sous Global Mapper

Les différents logiciels permettent une détection des lignes électriques dans le nuage de points. Certains logiciels sont plus adaptés à la détection des lignes électriques que d'autres. L'association d'un lidar, possédant une centrale inertielle de grande précision, et une antenne GNSS utilisant les données de plusieurs constellations de satellites, corrigé par un pivot GNSS, permettent d'obtenir des données précises.

La particularité du lidar aéroporté est qu'il peut être déployé sur des zones précises avec une grande vitesse d'exécution. C'est un outil dont le but est de réaliser l'acquisition de zone moyenne pouvant s'étendre sur plusieurs kilomètres.

Le traitement sous les différents logiciels nous a permis de mettre en évidence des erreurs de classifications entre les lignes électriques et leur environnement proche (Figure 43). Le type de la ligne avec la hauteur, forme, composition et courbure sont des facteurs impactant, pour certains logiciels, la détection des lignes électriques.

D'après nos différents tests, nous avons pu montrer que lorsque nous disposons d'un nuage de points suffisamment dense, minimum 50 points par m<sup>2</sup>, nous pouvons réaliser une détection au sein du nuage de points d'entités linéaires comme les lignes électriques.

Pour la détection exclusive des lignes électriques Global Mapper est le logiciel le plus efficace cependant si l'objet de l'acquisition porte aussi sur la différenciation des lignes électrique et du fil de blindage ou de la détection des pylônes électriques, le logiciel le plus adéquat est Lipowerline.

La méthodologie d'acquisition du nuage de points puis des traitements sur ce nuage avec les différents logiciels choisi est adaptée pour répondre à notre objectif de détection des lignes électriques dans le nuage de points du lidar aéroporté.

## Conclusion

Pour rester compétitives, les entreprises d'aujourd'hui sont dans l'obligation de suivre l'évolution des technologies avec une attention portée sur la technologie Lidar aéroporté. Le Lidar aéroporté est une solution innovante pouvant apporter de réelles opportunités au cabinet Bbass d'un point de vue vitesse d'acquisition et permettre des acquisitions dans des espaces contraignants d'accès.

L'objectif de ce TFE était la détection des lignes électriques dans le nuage de points du Lidar aéroporté. L'état de l'art nous a permis de mieux comprendre le fonctionnement des lidars et leurs capacités. Nous avons pu voir l'assise du drone, devenue indispensable dans les cabinets de géomètres face à l'offre pléthorique de missions possibles. L'association avec un Lidar est quelque chose de puissant dans l'acquisition de donnée.

Le nuage de point du Lidar aéroporté est moins dense que celui du scanner statique rendant la classification des lignes électriques plus contraignante. Cependant, les logiciels choisis nous ont montré qu'ils sont adaptés à la détection de manière automatique ou semi-automatique des lignes électriques dans un nuage de points peu dense.

Les logiciels étudiés au cours de ce TFE nous ont permis de comprendre les différents processus de classification et voir leur efficacité. Global Mapper est le logiciel répondant le mieux à notre problématique de détection des lignes dans le nuage de points par sa diversité d'outils, facilité d'utilisation et possibilité de créer ses propres scripts tout en pouvant modifier les paramètres de détection. Le logiciel Lipowerline est adapté pour une détection de grandes lignes électriques 90 kV et plus mais permet de classifier le câble de blindage et les pylônes électriques. Le Logiciel Cyclone 3DR est moins performant, cependant, avec des nuages denses, il répond parfaitement à notre problématique.

Le Vx-20 permet une acquisition importante de données en un faible laps de temps par rapport au scanner statique et dynamique. Chaque système possède ses avantages et inconvénients, c'est pourquoi il est essentiel de choisir le bon outil pour le bon chantier dans le bon environnement.

Nous disposions d'un Lidar émettant 100 000 impulsions par seconde. Cette cadence était peut-être trop faible pour un rendu optimal des détails, nous pourrions tester des lidars émettant 300 000 à 500 000 impulsions par seconde et voler à une altitude plus proche des câbles électriques.

Ce TFE a permis la mise en œuvre d'une procédure de traitement de nuage de points issue d'un lidar aéroporté non présente dans le cabinet. Cela a nécessité la recherche de partenaires et de connaissances pour répondre aux besoins de l'utilisation de cette technologie.

A travers ce TFE, j'ai découvert les méthodes d'utilisation des lidars, encore jamais étudiées au cours de mon cursus. Leur technologie innovante et le gain de temps avec ce type d'appareil sont un atout considérable face aux scanners statiques. Cependant, des évolutions sont à prévoir concernant les capteurs lidar, surtout vis-à-vis de la précision de ceux-ci, leur principal défaut.

Nous avons pu voir que la détection des lignes électriques, ici 90 000 et 20 000 volts, dans le nuage de points du lidar aéroporté est possible suivant la méthode d'acquisition et de traitement employé à travers différents logiciels mettant en œuvre divers algorithmes.

Un axe de recherche possible serait de savoir s'il est possible de détecter le nombre d'isolants et leurs états sur les lignes électriques dans le nuage de points du Lidar.

Un autre axe de recherche possible serait l'utilisation d'un lidar aéroporté associé à une caméra thermique infrarouge afin de détecter les pertes de chaleur sur les lignes électriques.

## Bibliographie

### Ouvrages imprimés :

[Simonetto, 2020] Photogrammétrie / Vision et traitement des nuages de points 3D. École Supérieure des Géomètres et Topographes, Le Mans.

[Cali, 2020] Géoréférencement direct, Levé statique, Levé dynamique. École Supérieure des Géomètres et Topographes, Le Mans.

[Charlet, 2020] Du bon usage des drones. École Supérieure des Géomètres et Topographes, Le Mans.

### Travaux universitaires :

[Ait-Mansour, 2014] Extraction d'éléments géométriques dans un nuage de points Lidar terrestre : Application aux relevés de façades, Mémoire présenté en vue d'obtenir le diplôme d'ingénieur CNAM spécialité Géomètre et Topographe, École Supérieure des Géomètres et Topographes (ESGT) Le Mans, 17/09/2014, 85p. Disponible sur [:https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01164570/document](https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01164570/document)

[BENNIS, 2015] Contribution à la reconstruction 3D de bâtiments à partir de nuage de points de scanner laser terrestre. Thèse de doctorat spécialité Automatique, traitement du signal et de l'image, génie informatique, Université de Lorraine de Nancy, Soutenue le 02/10/2015, 112p. Disponible sur : <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01751968/document>

[Boulaassal, 2010] Segmentation et modélisation géométriques de façades de bâtiments à partir de relevés laser terrestres. Thèse de doctorat spécialité Topographie-Géomatique, Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Strasbourg, Soutenue le 03/02/2010, 214p.

[Chauveau, 2014] Apport du filtrage de Kalman aux systèmes de positionnement embarqués et à l'auscultation. Mémoire présenté en vue d'obtenir le diplôme d'ingénieur CNAM spécialité Géomètre et Topographe, École Supérieure des Géomètres et Topographes (ESGT) Le Mans, 10/07/2014, 83p. Disponible sur : <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01164654/document>

[Didier, 2020] Relevés par Lidar mobile de cours d'eau et intégration des profils aux relevés bathymétriques réalisés par sondeur mono-faisceau. Mémoire d'ingénieur spécialité Topographie-Géomatique, Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Strasbourg, Soutenu le 25/09/2020, 59p. Disponible sur : [http://eprints2.insa-strasbourg.fr/4131/1/Rapport\\_PFE\\_DIDIER\\_G5.pdf](http://eprints2.insa-strasbourg.fr/4131/1/Rapport_PFE_DIDIER_G5.pdf)

[Direction Générale de l'Aviation Civile, 2020] Usages professionnels des aéronefs sans équipage à bord, catégorie spécifique. Disponible sur : [https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Guide\\_categorie\\_Specifique\\_0.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Guide_categorie_Specifique_0.pdf)

[Doceul, 2017] Caractérisation de la végétation de Rennes Métropole par relevé Lidar en vue de sa modélisation. Mémoire présenté en vue d'obtenir le diplôme d'ingénieur CNAM spécialité Géomètre et Topographe, École Supérieure des Géomètres et Topographes (ESGT) Le Mans, 30/06/2017, 81p. Disponible sur : <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01834418/document>

[Marchand, 2018] Optimisation du traitement de nuage de points pour la production de plan de façade au sein d'un cabinet de géomètre-expert. Mémoire présenté en vue d'obtenir le diplôme d'ingénieur CNAM spécialité Géomètre et Topographe, École Supérieure des Géomètres et Topographes (ESGT) Le Mans, 04/07/2018, 81p. Disponible sur : <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02093629/document>

[Poullain, 2013] Exploitation de l'intensité du signal LASER d'un Lidar topographique aéroporté pour des environnements littoraux sableux. Thèse de doctorat spécialité Terres solides et enveloppe superficielle, Université de Caen Basse-Normandie, Soutenu le 05/12/2013, 199p. Disponible sur : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00924649/document>

[Seguin, 2014] Mise en place d'une procédure de classification du sol dans un nuage de points issus d'acquisition par Lidar aéroporté. Mémoire présenté en vue d'obtenir le diplôme d'ingénieur CNAM spécialité Géomètre et Topographe, École Supérieure des Géomètres et Topographes (ESGT) Le Mans, 10/06/2014, 63p. Disponible sur : <https://edocuments-scd.cnam.fr/esgt/tfe/2014/B/SEGUIN%20Titouan.pdf>

[Thoury, 2017] Lidar aéroporté : de l'acquisition aux livrables. Mémoire d'ingénieur spécialité Topographie-Géomatique, Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Strasbourg, Soutenu le 20/09/2017, 107p. Disponible sur : [http://eprints2.insa-strasbourg.fr/3027/3/THOURY\\_PFE\\_Memoire%2BAnnexes.pdf](http://eprints2.insa-strasbourg.fr/3027/3/THOURY_PFE_Memoire%2BAnnexes.pdf)

[Tournadre, 2015] Métrologie par photogrammétrie aéroportée légère : application au suivi d'évolution de digues. Thèse de Doctorat, Spécialité Traitement des images, Université Paris-Est, 249p. Disponible sur : <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01373128>

[Vandenbroek, 2018] Photogrammétrie par drone d'un petit glacier de montagne. Mémoire de Master, Spécialité « Science géographique, orientation géomatique et géomorphologie, Université de Liège (Belgique), 92 p. Disponible sur <http://hdl.handle.net/2268.2/5586>

[Xiang, 2014] 3D Reconstruction of 138 KV Powerlines from Airborne Lidar Data. Thèse de Doctorat, Spécialité Science in Geography, University of Waterloo, 127p. Disponible sur : [https://uwspace.uwaterloo.ca/bitstream/handle/10012/8269/Xiang\\_Qing.pdf?sequence=1](https://uwspace.uwaterloo.ca/bitstream/handle/10012/8269/Xiang_Qing.pdf?sequence=1)

### **Articles de périodiques électroniques :**

[Anderson et Gaston, 2013] Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*. Disponible sur : [https://www.researchgate.net/publication/259502892\\_Lightweight\\_unmanned\\_aerial\\_vehicles\\_will\\_revolutionize\\_spatial\\_ecology/link/0c96052d7e2be5a712000000/download](https://www.researchgate.net/publication/259502892_Lightweight_unmanned_aerial_vehicles_will_revolutionize_spatial_ecology/link/0c96052d7e2be5a712000000/download)

[Axelsson, 1999] Processing of laser scanner data—algorithms and applications. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. Disponible sur : [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271699000088?casa\\_token=0F5GVr6wpG4AAAAA:cmwxhOncq6clZue1IKIDvkRjFq7mcZwhS6c3j8FcEWbz00b4d3xEE2hxVJuxeOLCIZQXu65Dw](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271699000088?casa_token=0F5GVr6wpG4AAAAA:cmwxhOncq6clZue1IKIDvkRjFq7mcZwhS6c3j8FcEWbz00b4d3xEE2hxVJuxeOLCIZQXu65Dw)

[Azevedo et al, 2019] Lidar-Based Real-Time Detection and Modeling of Power Lines for Unmanned Aerial Vehicles. Sensors. Disponible sur : [https://www.researchgate.net/publication/332471255\\_Lidar-Based\\_Real-Time\\_Detection\\_and\\_Modeling\\_of\\_Power\\_Lines\\_for\\_Unmanned\\_Aerial\\_Vehicles](https://www.researchgate.net/publication/332471255_Lidar-Based_Real-Time_Detection_and_Modeling_of_Power_Lines_for_Unmanned_Aerial_Vehicles)

[Flamant, 2019] Comprendre la science du Lidar. LATMOS Laboratoire Atmosphère Milieux Observations Spatiales, Sorbonne Université, Paris. Disponible sur : <https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/insu-02292412/document>

[Kim et Sohn, 2010] 3d classification of power-line scene from airborne laser scanning data using random forests. Earth and Space Science and Engineering Department, York University. Disponible sur : <https://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/part3/a/pdf/zwi/23-XXXVIII-part3A.pdf>

[Liu et al, 2009] Classification of Airborne LIDAR Intensity Data Using Statistical Analysis and Hough Transform with Application to Power Line Corridors. Digital Image Computing: Techniques and Applications Conference (DICTA 2009), IEEE Computer Society, Melbourne, Victoria. Disponible sur: [https://www.researchgate.net/publication/224100802\\_Classification\\_of\\_Airborne\\_LIDAR\\_Intensity\\_Data\\_Using\\_Statistical\\_Analysis\\_and\\_Hough\\_Transform\\_with\\_Application\\_to\\_Power\\_Line\\_Corridors](https://www.researchgate.net/publication/224100802_Classification_of_Airborne_LIDAR_Intensity_Data_Using_Statistical_Analysis_and_Hough_Transform_with_Application_to_Power_Line_Corridors)

[Melzer et Briese, 2004] Extraction and Modeling of Power Lines from ALS Point Clouds. -Laboratory for Spatial Data from Laser Scanning and Remote Sensing at Institute of Photogrammetry and Remote Sensing Vienna University of Technology. Disponible sur : <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.84.3645&rep=rep1&type=pdf>

[Pu et Vosselman, 2006] Automatic extraction of building features from terrestrial laser scanning. International Institute for Geo-information Science and Earth Observation. Disponible sur : [https://www.researchgate.net/publication/237135681\\_Automatic\\_extraction\\_of\\_building\\_features\\_from\\_terrestrial\\_laser\\_scanning](https://www.researchgate.net/publication/237135681_Automatic_extraction_of_building_features_from_terrestrial_laser_scanning)

[Tarsha-Kurdi et al, 2007] Model-driven and data-driven approaches using LIDAR data: Analysis and comparison. Photogrammetry and Geomatics Group, MAP-PAGE UMR 694, INSA de Strasbourg. Disponible sur : [https://www.researchgate.net/publication/32227577\\_Model-driven\\_and\\_data-driven\\_approaches\\_using\\_LIDAR\\_data\\_Analysis\\_and\\_comparison](https://www.researchgate.net/publication/32227577_Model-driven_and_data-driven_approaches_using_LIDAR_data_Analysis_and_comparison)

[Vallet, 2011] La lasergrammétrie aéroportée, approches théoriques, concepts, méthodes. Collection EDYTEM. Cahiers de géographie, Année 2011, p. 29-40. Disponible sur: [https://www.persee.fr/doc/edyte\\_1762-4304\\_2011\\_num\\_12\\_1\\_1175](https://www.persee.fr/doc/edyte_1762-4304_2011_num_12_1_1175)

[Vosselman et al, 2004] Recognizing structure in laser scanning point clouds. International Institute of Geo-Information Science and Earth Observation (ITC). Disponible sur : [https://www.researchgate.net/publication/290812094\\_Recognizing\\_structure\\_in\\_laser\\_scanning\\_point\\_clouds](https://www.researchgate.net/publication/290812094_Recognizing_structure_in_laser_scanning_point_clouds)

[Wang et al, 2008] The evolution of Lidar and its application in high precision measurement. IOP Conference Series Earth and Environmental Science. Disponible sur : [https://www.researchgate.net/publication/341831431\\_The\\_evolution\\_of\\_Lidar\\_and\\_its\\_application\\_in\\_high\\_precision\\_measurement](https://www.researchgate.net/publication/341831431_The_evolution_of_Lidar_and_its_application_in_high_precision_measurement)

[Yang et al, 2016] Two-step adaptive extraction method for ground points and breaklines from Lidar point clouds. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. Disponible sur : [https://www.researchgate.net/publication/305768718\\_Two-step\\_adaptive\\_extraction\\_method\\_for\\_ground\\_points\\_and\\_breaklines\\_from\\_lidar\\_point\\_clouds](https://www.researchgate.net/publication/305768718_Two-step_adaptive_extraction_method_for_ground_points_and_breaklines_from_lidar_point_clouds)

[Zhu et Hyyppä, 2014] Fully-Automated Power Line Extraction from Airborne Laser Scanning Point Clouds in Forest Areas. Remote sensing, MDPI. Disponible sur : [https://www.researchgate.net/publication/268213943\\_Fully-Automated\\_Power\\_Line\\_Extraction\\_from\\_Airborne\\_Laser\\_Scanning\\_Point\\_Clouds\\_in\\_Forest\\_Areas](https://www.researchgate.net/publication/268213943_Fully-Automated_Power_Line_Extraction_from_Airborne_Laser_Scanning_Point_Clouds_in_Forest_Areas)

## **Webinaire**

[Nicolas Marcou, 2020] Aéronefs sans équipage à bord - Transition vers la réglementation européenne. Aerospace Valley. Disponible sur : <https://www.youtube.com/watch?v=UdIKuwXOSWE>

## **Sites web :**

<https://www.asprs.org/>

<https://cesml.com/>

<https://www.danielgm.net/cc/>

<https://www.dji.com/>

<https://www.drone-act.com/reglementation/>

<https://escadrone.com/regulation-drone-europe-2020/>

<https://www.geomatique.fr/globalmapper/>

<https://www.geo-plus.com/logiciel-nuage-de-points/?lang=fr>

<https://greenvalleyintl.com/software/lipowerline/>

<https://hexadrone.fr/>

<https://www.mach7drone.com/>

<https://www.onyxscan-Lidar.com/>

<https://www.positics.fr>

<https://www.rte-france.com/l-heritage-de-la-tempete/>

<https://www.studiofly.fr/les-drones-un-siecle-de-recherches-et-d-elaboration/>

<https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Espace-aerien.html>

<https://www.yellowscan-Lidar.com/>

## Table des annexes

Annexe 1 Tableau des catégories de drones.....	67
Annexe 2 Chaîne de traitement .....	68
Annexe 3 Traitement sous Global Mapper .....	75
Annexe 4 Traitement sous Lipowerline .....	77
Annexe 5 Temps de Travail .....	80

## Annexe 1

### Tableau des catégories de drones

La réglementation européenne intervient pour harmoniser les réglementations nationales vis-à-vis des drones à l'échelle européenne. Cette réglementation est entrée en vigueur le 1<sup>er</sup> janvier 2021 apportant de nouvelles catégories de drone en fonction de diverses caractéristiques explicitées dans le tableau suivant.

Catégorie	A1		A2	A3		STS-01	STS-02
Classe drone							
Hauteur max	120 m	120 m	120 m	120 m	120 m	120 m	120 m
Poids max	250 g	900 g	4 kg	25 kg	25 kg	25 kg	25 kg
Dimensions max	?	?	?	?	?	3 m	3 m
N° de série & signalement électronique	n	v	v	v	n	v	v
Signalement lumineux	n	n	v	v	n	?	?
Survol de tiers	Autorisé (sauf groupes de personnes)	n (toléré si involontaire)	n	n	n	n	n
Proximité tiers	v	v	30 m ou 5 m si mode lent (3m/s)	150 m	150 m	150 m	150 m
Visuel en vol	En vue	En vue	En vue	En vue	En vue	En vue	Hors vue (1km max ou 2 km si observateur)
Equivalent réglementation française	S1	S1	S1	S1	S1	S1(zone réglementé) /S3	S2

Tableau 6: Catégorie des drones

## Annexe 2

### Chaîne de traitement

#### Préparation du vol :

Il faut se demander quelle densité de points souhaite-t-on obtenir, l'écart entre les points, la quantité de trous dans l'acquisition. Cela permet d'amener des réponses sur la hauteur, la vitesse de vol et le recouvrement.

Le scanner peut réaliser des mesures à 360 ° cependant il faut prendre en compte seulement des angles de 60 ° de part et d'autre du nadir.

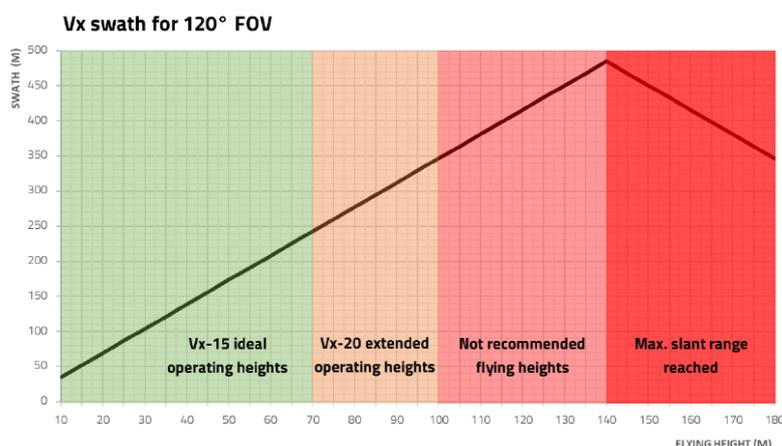


Figure 44: Largeur de fauchée en fonction de la hauteur [Positics]

À une hauteur de vol de 50 m, nous obtenons une fauchée de 175 m.

Il est conseillé de voler entre 10 et 100 m.

Lors de la planification de vol, il faut prévoir un recouvrement de 20 à 60 % suivant la scène à lever : terrain plat ou bâtiment.

Il faut éviter de réaliser des lignes droites de plus de 800 m.

Il est préférable de voler plus que ce qui est nécessaire et de toujours avoir le faisceau du Lidar perpendiculaire à l'objet visé.

Pour planifier le vol, il est possible d'utiliser les applications : UgCS ou Pix4Dsurvey, DJI GSP.

## Sur le terrain :

Placer une antenne GNSS au centre du chantier pour réaliser des mesures PPK tout au long du vol à 1 Hz (1h de mesure pour des résultats optimaux).

Il est possible d'utiliser un réseau GNSS permanent néanmoins, les résultats sont moins précis.

Vérifier qu'un système d'amortissement des vibrations est présent.



Figure 45: Système d'amortissement du drone [Positics]

Scanner fixé vers l'avant dont le bras de levier ne varie pas.

Placer l'antenne GNSS le plus éloignée possible des antennes GNSS du drone afin d'éviter des perturbations.

Vérifier si le système est fonctionnel, allumer le VX et vérifier si les LED clignotent.

Veiller à ce que le Lidar soit le plus possible au centre de gravité du drone.



Figure 46: Vue arrière du Lidar Vx-20

A : Port Radio pour la Live Station

B : Port Camera

C : Port d'alimentation externe

## Explication des symboles sous les led :



Led d'alimentation. S'allume en vert fixe quand la batterie est entre 100% et 33%

Alterne vert et rouge quand elle est entre 33 % et 10 %

Rouge fixe quand elle est en dessous de 10%



Led photo. Clignote en jaune lors de chaque déclenchement de cliché.



Led de position, s'allume en jaune lorsque l'IMU est synchronisé et qu'il y a suffisamment de satellites visibles, le système est prêt pour l'acquisition.

La led s'allume en jaune clignotant lors de l'acquisition ou quand le système est prêt à acquérir.



Led du scanner, s'allume en jaune fixe lorsque le scanner est synchronisé et clignote pendant l'acquisition.



Bouton d'opération, appui court pour lancer, arrêter l'enregistrement. Appui long (plus de 3 secondes) pour arrêter le système.



Connecteur pour le câble reliant l'IMU à l'antenne GNSS

## Lancement du système YellowScan Vx-20 :

1. Faire attention à ce que la batterie soit correctement chargée.
2. Brancher la clé USB.
3. Appuyer sur le bouton démarrer du Lidar à côté de la batterie.
4. Les leds du symbole position et scanner clignotent tant que le système n'est pas initialisé.
5. Une fois que les leds ne clignotent plus, le système est prêt à acquérir.

6. Faites un appui court sur le bouton jaune pour lancer l'acquisition. Les leds des symboles position et scanner vont clignoter à 1Hz.

7. Réaliser l'acquisition avec l'initialisation de l'IMU au début et à la fin du vol

8. Appui court sur le bouton jaune pour arrêter l'acquisition. La led du symbole position va clignoter rapidement (5 Hz). Pendant ce laps de temps, les données de l'IMU et GNSS (.T04) sont envoyées sur la clé. **NE RIEN TOUCHER.**

9. Une fois le transfert terminé, les leds des symboles position et scanner vont rester allumées, le système est prêt pour une nouvelle acquisition. Pour commencer une nouvelle acquisition, revenir à l'étape 6 sinon passer à l'étape 10.

10. Appui long sur le bouton jaune pour arrêter le système, attendre que toutes les leds soient éteintes (sauf celle de la batterie), attendre 5 secondes de plus puis éteindre le Lidar.

Pour initialiser la centrale inertielle, veiller à réaliser une accélération avant, arrière et avant avec un demi-tour serré (5 à 10 m). Cette procédure doit être réalisée au début et à la fin du levé pour obtenir de meilleur résultat lors du post-traitement.

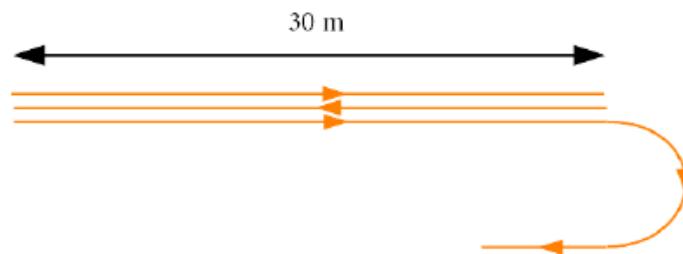


Figure 47: Manoeuvre à effectuer pour initialiser l'IMU [Positics]

Avant ou après l'acquisition, veillez à prendre les mesures du bras de levier, entre le centre du miroir du scanner et le centre de phase du GNSS, avant démontage du Lidar.

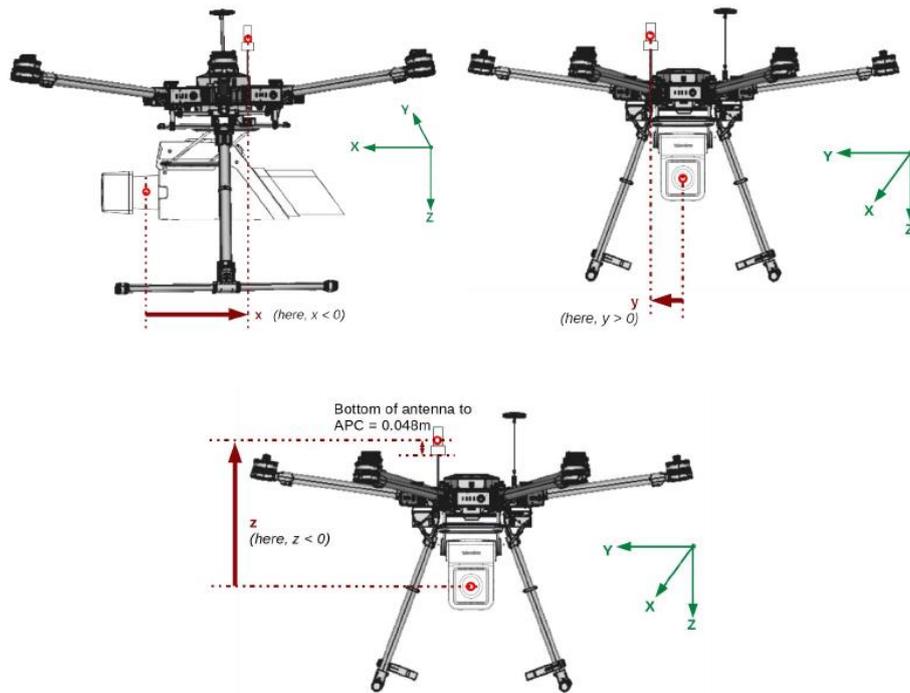


Figure 48 : Mesure du bras de levier du Lidar [Positics]

## Traitement de la trajectoire :

Pour traiter la trajectoire, se munir des fichiers .apx, .rxp, .T04 et .AAO.

 YS-20210610-124005.apx	Fichier APX	8 926 Ko	Trajectoire brute
 YS-20210610-124005.rxp	Fichier RXP	690 137 Ko	Données laser brutes
 YS-20210610-124005.T04	Fichier T04	26 110 Ko	Trajectoire pour le posttraitement
 2615161m00.21o	Fichier 210	8 445 Ko	Fichier RINEX

Ouvrir Pospac, créer un nouveau projet

- Importer le fichier .T04 puis le fichier de point RINEX.
- Dans coordinate Manager rentrer les coordonnées précises du Pivot, et rentrer les paramètres de la projection, Frame : ETRS89, l'ellipsoïde : WGS84 et la date d'acquisition du pivot.

- Clic droit sur le pivot, puis clic gauche sur Set Base Station.

Vérifier que le paramètre Fixed Solution est compris entre 98 et 100 %.

GNSS QC Statistics

Statistics	Min	Max	Mean
Baseline Length (km)	0.05	0.69	N/A
Number of GPS SV	7	9	8
Number of GLONASS SV	6	6	6
Number of QZSS SV	0	0	0
Number of BEIDOU SV	0	0	0
Number of GALILEO SV	0	0	0
Total Number of SV	13	15	14
PDOP	1.38	2.06	1.57
QC Solution Gap (s)	0.00	0.00	N/A

Fixed Epoch: 738.0 s Float Epoch: 0.0 s No Solution: 0.0 s  
 Fixed Solution: 100.00% Float Solution: 0.00% No Solution: 0.00%

OK

- Clic gauche sur Project Settings puis GNSS-Inertial Processor et Levers Arms and Mounting Angles
- Modifier les X, Y et Z du bras de levier avec les mesures prises sur le terrain et conserver une Standard Deviation de 10 cm. Validé avec OK.
- Lancer le calcul en cliquant sur GNSS-Inertial Processor puis cliquer sur RUN.
- Aller dans l'onglet reports, cliquer sur l'icône Display Plots
- Dans Calibrated Installation Parameter,
  - Rubrique X-Reference Primary GNSS Lever Arm : relever le bras de levier moyen en X
  - Rubrique Y-Reference Primary GNSS Lever Arm : relever le bras de levier moyen en Y
  - Rubrique Z-Reference Primary GNSS Lever Arm : relever le bras de levier moyen en Z
- Nous obtenons ainsi des valeurs de notre bras de levier, vérifier qu'elles sont proches (à quelques centimètres) de celles mesurées sur le terrain
- Retourner dans Project Settings / GNSS-Inertial Lever Processor / Lever Arms and Mounting Angles et rentrer le bras de levier calculer précédemment avec une Standard Deviation de 0.01 m
- Relancer un ajustement (Cliquer sur GNSS-Inertial Processor puis Run)
- Dans l'onglet Reports, Cliquer sur l'icône Display Plots
- Dans l'onglet Smoothed Performance Metrics, Reference Frame
  - Rubrique North Position Error RMS : relever la précision de positionnement en Y
  - Rubrique East Position Error RMS : relever la précision de positionnement en X
  - Rubrique Down Position Error RMS : relever la précision de positionnement en Z
- Dans l'onglet Real Time Trajectory, Référence Frame
  - Rubrique Total Acceleration : Vérifier que la plupart des valeurs sont en dessous de 0.1. Si la majorité des valeurs dépassent le seuil de 0.3 g cela peut vouloir dire qu'il y a un problème vis-à-vis des stabilisateurs.
- Pour exporter au format SBET aller dans l'onglet Tools puis cliquer sur Export. Enregistrer l'export au format .txt dans le dossier où se trouve les données du Vx et du Pivot et cliquer sur exporter.

## Ouvrir CloudStation

- Importer le fichier .apx
- Cliquer sur PP Solution et indiquer le fichier SBET.txt exporté précédemment
- Cliquer sur le Lidar (en haut à gauche) pour vérifier/indiquer les angles de roulis, lacet et tangage indiqué dans le certificat de calibration.
- Cliquer sur les segments de la trajectoire à conserver et ajuster leur début et fin avec les curseurs dans la frise chronologique en bas puis cliquer sur OK.
- Vérifier le géoréférencement avec le code EPSG : 32631
- Cliquer sur l'icône Play (Process)
- Examiner les données dans les différents types de visualisation
- Exporter le fichier las, faire attention à la version du las 1.2 ou 1.4

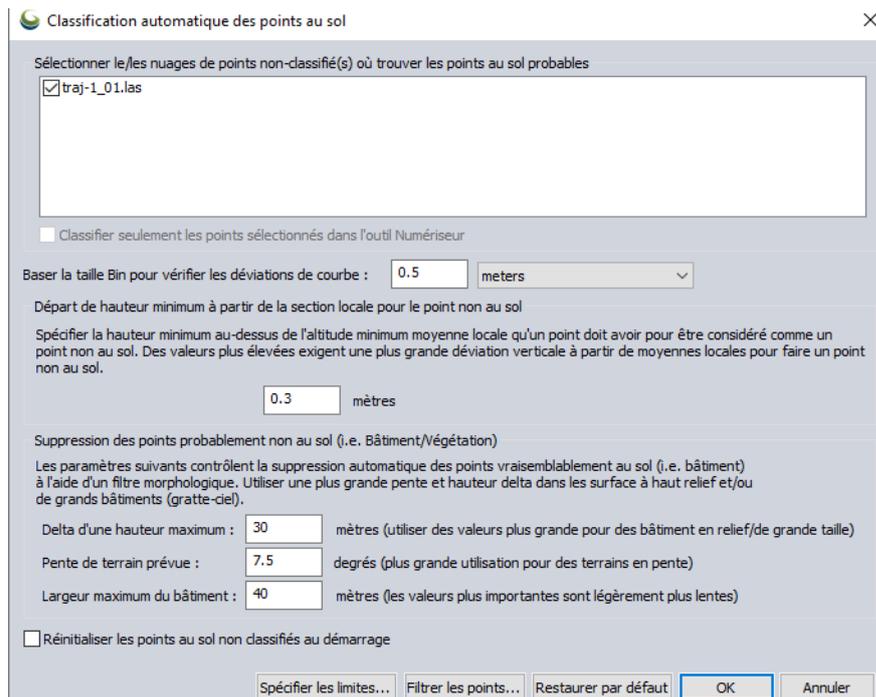
Problème	Solution
Beaucoup de bruit dans le nuage, sous le sol	Vérifier l'amortissement du scanner, cela peut être dû à de forte vibration
Du bruit est observé le long de la trajectoire, ainsi que dans les zones d'ombres	Vérifier que le train d'atterrissage n'obstrue pas la vue du scanner
Mal fonctionnement du GNSS, trous dans les mesures	L'antenne GNSS du VX interfère peut-être avec celles du drone. Isolé l'antenne du Lidar à au moins 10-20 cm des autres antennes
Les led ne s'allument pas	Vérifier la charge de la batterie, qu'elle soit correctement insérée
Après mise sous tension du Vx, les led clignotent mais ne se figent jamais	Vérifier la connexion de l'antenne GNSS au Lidar. Essayé un second câble. Vérifier que l'antenne GNSS n'est pas endommagée.
Lors de l'appui sur le bouton jaune les led restent allumées	Vérifier que la clé USB est correctement insérée. Vérifier que la clé USB est bien utilisable sur un PC.
Au retour du drone, toute les led étaient éteintes	La collecte est probablement incomplète. La batterie est certainement à plat, la remplacer par une nouvelle, refaire le vol si nécessaire.
Au retour du drone, la led scanner était allumée	La collecte est probablement incomplète. La clé USB est certainement pleine. La vider et refaire le vol si nécessaire

Tableau 7: Tableau de résolution des problèmes du Lidar [Positics]

## Annexe 3

### Traitement sous Global Mapper

Classification du sol :



Classification automatique des points au sol

Sélectionner le/les nuages de points non-classifié(s) où trouver les points au sol probables

traj-1\_01.las

Classifier seulement les points sélectionnés dans l'outil Numériseur

Baser la taille Bin pour vérifier les déviations de courbe :  mètres

Départ de hauteur minimum à partir de la section locale pour le point non au sol

Spécifier la hauteur minimum au-dessus de l'altitude minimum moyenne locale qu'un point doit avoir pour être considéré comme un point non au sol. Des valeurs plus élevées exigent une plus grande déviation verticale à partir de moyennes locales pour faire un point non au sol.

mètres

Suppression des points probablement non au sol (i.e. Bâtiment/Végétation)

Les paramètres suivants contrôlent la suppression automatique des points vraisemblablement au sol (i.e. bâtiment) à l'aide d'un filtre morphologique. Utiliser une plus grande pente et hauteur delta dans les surface à haut relief et/ou de grands bâtiments (gratte-ciel).

Delta d'une hauteur maximum :  mètres (utiliser des valeurs plus grande pour des bâtiment en relief/de grande taille)

Pente de terrain prévue :  degrés (plus grande utilisation pour des terrains en pente)

Largeur maximum du bâtiment :  mètres (les valeurs plus importantes sont légèrement plus lentes)

Réinitialiser les points au sol non classifiés au démarrage

Spécifier les limites... Filtrer les points... Restaurer par défaut OK Annuler

Pour classier le sol nous pouvons jouer sur 5 paramètres :

- 1. La zone de prise en compte 0.5 m, si nous sommes en présence de forte dénivelé descendre ce paramètre .
- 2. La hauteur minimum du point pour qu'il ne soit pas considéré comme sol, 0.3 m est valeur cohérente.
- 3. L'écart maximum entre le point le plus bas et le plus haut, 03 m est en accord avec la valeur du paramètre cité ci-dessus.
- 4. Valeur de la pente la plus forte sur le terrain, dépends de la zone.
- 5. Largeur maximum des bâtiments, dépends de la zone.

## Classification des lignes électriques :



Classification automatique des points LiDAR de ligne à haute tension et de poteaux

Configuration de la classification des lignes à haute tension

Rechercher et classer les points probables de lignes à haute tension

Hauteur minimale au-dessus du sol :  mètres

Distance maximum à partir de la ligne de Best Fit :  mètres

Taille de Bin à vérifier pour les points linéaires :  mètres

Changement de hauteur maximum par mètre :  mètres

Configuration de la classification des poteaux (BETA)

Rechercher et classer les points de poteau probables

Nuage de point lissé  Temps avant la classification

Distance du voisin à utiliser pour lisser :  mètres

Hauteur minimale du poteau :

Points minimum par poteau :

Seuil de classement pour le poteau :  %

Étendue horizontale maximale du poteau :  mètres

Ne classifier que les poteaux au niveau du sol

Sélectionner un ou plusieurs nuages de points non classifié pour trouver les points non au sol susceptibles

traj-3.las

Classifier uniquement les points LiDAR sélectionnés avec l'outil Numériseur

Réinitialiser les points existants non liés au sol au départ

Spécifier les limites... Filtrer les points par Elev/Class/etc...

Réinitialiser OK Annuler

Pour classer les nous pouvons jouer sur 4 paramètres :

- 1. Hauteur minimale au-dessus du sol pour classer les lignes électriques, la moitié de la hauteur des lignes électriques les plus basses est un nombre adéquate.
- 2. Distance la plus éloigné des points raccroché détecté comme ligne, 0.2 m est une valeur convenable.
- 3. Taille de la zone de prise en compte, laisser la valeur 1.5 m.
- 4. Le changement de hauteur par mètre dépend de la ligne électrique, une valeur entre 0.4 et 0.8 m est approprié.

## Annexe 4

### Traitement sous Lipowerline

Faire attention de bien choisir le voltage de la ligne, 90 kV fonctionne avec le paramétrage 220 kV, ainsi que les différentes couches et distances de détection.

The screenshot shows the 'Classify and Detect Parameters' dialog box. It contains the following fields and options:

- Working Directory:** C:/Users/f.authie/Desktop/Nuage de point/
- Input Point Cloud Spatial Coordinate:** RGF93 / CC43
- Classification and Detection Parameters:** C:/Program Files/GreenValley Suite/LiPowerline/2.4.1.0/Sample.xml
- Detected Line Voltage Level:** 20 kV
- Functional Mode:** Professional Mode (selected), Quick Mode

	Select	Class	Detection Type	Distance
1	<input type="checkbox"/>	2-Ground	Space Distanc	6.5
2	<input checked="" type="checkbox"/>	3-Low Vegetat	Space Distanc	4
3	<input checked="" type="checkbox"/>	4-Medium Veç	Space Distanc	4
4	<input checked="" type="checkbox"/>	5-High Vegeta	Space Distanc	4
5	<input checked="" type="checkbox"/>	6-Building	Space Distanc	6
6	<input checked="" type="checkbox"/>	11-Railway	Space Distanc	8.5
7	<input checked="" type="checkbox"/>	12-Road	Space Distanc	8
8	<input checked="" type="checkbox"/>	13-Unnavigab	Space Distanc	4
9	<input type="checkbox"/>	18-Scissors Cr	Space Distanc	4
10	<input checked="" type="checkbox"/>	25-Navigable l	Space Distanc	7



Par cet icône sélectionner les différents pylônes

Une fois sélectionné les différents pylônes apparaissent, il faut sélectionner un type : Tour de tension ou Tour en ligne droite. Appuyer à nouveau sur l'icône au-dessus de la table pour verrouiller la sélection.



Name	Type	Index
1	Straight Line Tower -	1
2	Straight Line Tower -	2
3	Straight Line Tower -	3



Sélectionné cet icône pour classifier le nuage de point

Une fenêtre s'ouvre avec 3 onglets :

- 1 er onglet : Clip Parameter :
  - . 1 Channel width est la longueur de la bande prise en compte autour de la ligne électrique
  - . 2 Segment buffer représente la taille de la zone prise en compte pour classer les lignes électriques
  - . 3 Start et end tower représente le chiffre de l'emplacement du premier et dernier pylône à traiter.

<input checked="" type="checkbox"/> Clip	<input checked="" type="checkbox"/> Classify	<input type="checkbox"/> Filter Noise	
Clip Parameter	Classify Parameter	Filter Noise Parameter	
Channel Width:	<input type="text" value="100"/> m	Segment Buffer:	<input type="text" value="10"/> m
Start Tower Index:	<input type="text" value="1"/>	End Tower Index:	<input type="text" value="3"/>
<input type="checkbox"/> Point Cloud Compression			

- 2 eme onglet : Classify Parameter :
  - . 1 La taille maximum des immeubles, laisser la valeur par défaut
  - . 2 L'angle maximum du terrain, laisser la valeur par défaut
  - . 3 L'iteration d'angle, laisser la valeur par défaut
  - . 4 L'itération de distance, laisser la valeur par défaut

- 3 eme onglet : Filter Noise Parameter :
  - . 1 Numero de point, laisser la valeur par défaut
  - . 2 Rayon de filtre de bruit, laisser la valeur par défaut

Une fois le traitement terminé clic droit sur le nuage dans .... Remove puis importer les classifications de travées dans Section Data

## **Annexe 5**

### **Temps de Travail**

Dans cette partie, nous allons comparer trois systèmes utilisés pour les mesures des lignes électriques :

- Un scanner statique, Leica RTC 360
- Un scanner dynamique, Leica Backpack
- Un Lidar YellowScan VX-20 monté sur un drone DJI M600 PRO

#### **Le temps sur le terrain :**

Les temps de mise en œuvre ne sont pas du tout les mêmes entre ces 3 techniques. Pour le scanner statique 10 minutes suffisent à monter l'appareil, connecter la tablette et se déplacer jusqu'à la zone de prise de donnée, il n'a pas besoin d'initialisation.

Avec le Backpack nous sommes sur une mise en œuvre de 20 minutes avec le temps d'initialiser la centrale inertielle et les capteurs GNSS, en réalisant un carré de 10 m de côté, et se déplacer jusqu'à la zone de prise de donnée.

Enfin, le drone équipé du capteur Lidar a besoin d'une mise en œuvre bien plus importante que les scanners avec le temps de sortir le drone, mettre en place les batteries et les pieds, ajuster la fixation rapide au drone pour recevoir le Lidar, mettre en place le pivot et se déplacer jusqu'à la zone de prise de donnée. Nous sommes sur un temps de mise en œuvre de l'ordre de 1h.

Les temps d'acquisition diffèrent entre les différents systèmes, pour le RTC 360 nous avons réalisé 18 stations qui nous ont pris un temps approximatif de 1h, ajouté à cela 15 min pour prendre l'emplacement des porte-cibles au GNSS.

Pour le Backpack, l'acquisition dure seulement 12 min, cela dépend aussi de la vitesse de marche du porteur.

Alors que le drone équipé du Lidar met un temps de 10 minutes pour acquérir la donnée avec la partie initialisation au début et à la fin du levé.

Pour sortir les données, les 3 systèmes sont équivalents, car ils exportent tous sur une clé USB.

### **Le temps de traitement des données :**

La principale différence se manifeste lors du traitement des données. Avec le RTC 360, nous réalisons les calculs sur le logiciel Register 360, de chez Leica, pour obtenir un nuage de point géoréférencé nous mettons un temps de traitement de 1h.

Avec le Backpack nous traitons les données sous le logiciel Pegasus Manager, de chez Leica. Pour obtenir un nuage de point géoréférencé, nous mettons un temps de traitement de l'ordre de 2h.

Avec le Lidar nous traitons les données, comme vues précédemment, sur les logiciels PosPac et CloudStation. Le temps de traitement approxime les 1h.

### **Les aspects positifs et négatifs des différentes acquisitions :**

Ces différentes techniques présentent certains aspects positifs et négatifs que nous allons détailler.

Pour pouvoir voler en drone il faut une formation spécifique et obtenir un diplôme de télépilote, mais il faut aussi déposer une demande d'autorisation de vol qui apporte des lourdeurs administratives. Les deux scanners, statiques et dynamiques, sont exempts de toutes formations et autorisations.

Un aspect non négligeable est l'autonomie des différents appareils avec un seul jeu de batterie. Le Lidar possède une autonomie de 1h30 freinée par celle du drone qui est de l'ordre de 16 minutes de vol avec la charge du Lidar. Comparé à cela le RTC 360 et le Backpack possèdent une autonomie de l'ordre de 4h permettant une acquisition plus sereine et moins discontinue.

A contrario, le drone possède une vitesse d'acquisition de l'ordre de 18 km/h, pour notre levé, contrebalançant son autonomie amoindrie, alors que le Backpack évolue à une vitesse de marche de l'ordre de 4-5 km/h. Le RTC 360 étant un scanner statique, ne nécessitant pas de verticalisation grâce à une centrale inertielle, nous réalisons une acquisition estimée à 0.3 km/h.

Cependant, le drone peut évoluer sans gêne dans les airs évitant ainsi la gêne occasionnée par la végétation dense ou la morphologie du terrain peu avantageuse. Sur une partie du terrain nous n'avons pas pu évoluer avec les scanners, en cause une végétation

trop dense et, trop peu de satellites pour le Backpack, mais aussi trop peu de formes géométriques pour pouvoir recalibrer les nuages du RTC 360.

### **Les ressources matérielles et humaines :**

Les ressources matérielles sont celles permettant de réaliser le levé des lignes électriques.

Le relevé par scanner statique a nécessité :

- Un scanner RTC 360 / cible / porte-cible
- Un GNSS Trimble R2
- Le logiciel Register 360

Le relevé par scanner dynamique a nécessité :

- Un Backpack
- Le logiciel PEGASUS

Le relevé par Lidar aéroporté a nécessité :

- Un drone M600 PRO / tablette tactile pour le plan de vol
- Un Lidar Vx-20 / fixation rapide
- Un pivot GNSS
- Un diplôme de télépilote de drone
- Les logiciels Pospac et CloudStation

L'analyse matérielle met clairement en évidence un investissement supplémentaire lorsque l'on souhaite utiliser la méthode par Lidar aéroportée. La méthode par scanner ne nécessite que du matériel déjà à disposition de l'entreprise de manière générale.

Le coût humain est néanmoins exactement le même, une seule personne suffit pour lancer les scans sur le RTC 360, marcher avec le Backpack et piloter le drone.

## L'aspect économique :

D'un point de vue économique, le budget s'élève à hauteur de 60 000 € investi afin de réaliser l'acquisition pour le RTC 360.

Pour le Backpack la somme investie avoisine les 200 000 € alors que pour le drone nous sommes sur un budget de 4 000 € en location sur 2 jours amenés pour un achat à plus de 180 000 €, ajouter à cela les différents logiciels ainsi que les différentes formations, le budget final avoisine les 200 000 €.

Le budget se rapproche de celui du Backpack cependant, leurs missions sont très différentes.

Matériels	RTC 360	Backpack	Lidar sur drone
Mise en œuvre	+++	++	+
Temps d'acquisition	+	++	+++
Traitement des données	++	+	+++
Aspect administratif / Formation	+++	+++	-
Autonomie de batterie	+++	+++	-
Vitesse	-	++	+++
Influence du terrain	+	+	+++
Bilan matériel	++	+++	+
Coût humain	+	+	+
Aspect économique	+++	++	++

Tableau 8: Bilan de l'analyse des méthodes

## Liste des figures

Figure 1: Localisation des différents sites [geoportail.gouv.fr] .....	9
Figure 2: Composant du Lidar dynamique [www.onyxscan.com].....	12
Figure 3: différents types de balayage du scanner [Vallet, 2011] .....	13
Figure 4: Retour d'onde en fonction des objets rencontrés [Didier, 2020] .....	14
Figure 5: Schéma de géoréférencement du nuage de point [Vallet, 2011] .....	16
Figure 6: Géoréférencement direct du nuage de points [Vallet, 2011] .....	17
Figure 7: Acquisition nadirale (Gauche) et acquisition oblique (Droite) [Vallet, 2011] .....	18
Figure 8: Réfraction de matériaux en fonction de la longueur d'onde [Didier, 2020].....	19
Figure 9: Graphique de matériaux en fonction de leur humidité [Didier, 2020].....	19
Figure 10: Parrot Disco [Lesnumeriques.com] (À Gauche) Drone Pixfly [Escadrone.com] (À Droite) .....	21
Figure 11: Drone M300 RTK [DJI.com] (À Gauche) Drone Parrot Anafi [Parrot.com] (À Droite).....	22
Figure 12 : Drone Heliplane [Dronevolt.com] (À Gauche) Drone CH-804C [estpendulum.com] (A Droite).....	22
Figure 13: Zones de restrictions des hauteurs de vols à proximité d'un aérodrome [digitalairworks-aircraft.com] .....	23
Figure 14: Plan de situation de la zone de levé [Géoportail] .....	29
Figure 15: Collectivité locale fournit par la CESML [CESML] (À Gauche) Barrage de Bertrand [CESML] (À Droite) .....	29
Figure 16: Photo de la ligne électrique levée .....	30
Figure 17: Carte des restrictions de vol sur la zone, échelle non définie [mach7drone.com] .....	31
Figure 18: Drone M600 PRO avec un Lidar Vx-20.....	31
Figure 19: Temps de vol du drone M600 [Dji.com] (À Gauche) Densité du Lidar [Yellowscan.fr] (À Droite) .....	32
Figure 20: Manoeuvre à effectuer pour initialiser l'IMU [Positics] .....	33
Figure 21: Bras de levier du Lidar .....	34
Figure 22: Accélération du drone (À Gauche) RMS sur la position verticale (À Droite).....	35
Figure 23: RMS sur la position Nord (À Gauche) RMS sur la position Est (À Droite).....	35
Figure 24: Trajectoire corrigée.....	35
Figure 25 : Sélection de la trajectoire 3 à exporter.....	36
Figure 26: Sélection de la trajectoire 2 à exporter.....	36
Figure 27: Nuage de point suivant l'intensité [CloudCompare] .....	37
Figure 28: Classification du nuage de points de la ligne 90 kV issu de Global Mapper.....	40
Figure 29: Coupe du nuage classifié de la ligne 90 kV sous Global Mapper .....	40
Figure 30: Classification du nuage de points de la ligne 20 kV sous Global mapper .....	41
Figure 31: Coupe du nuage de la ligne 20 kV sous Global Mapper.....	42
Figure 32: Nuage de la ligne 90 kV issu de Lipowerline.....	44
Figure 33: Sélection des pylônes sous Lipowerline .....	45
Figure 34: Coupe de la travée entre le pylône 1 et 2 sous Lipowerline .....	45
Figure 35: Coupe de la travée entre le pylône 2 et 3 sous Lipowerline .....	46
Figure 36: Coupe du nuage de la ligne de 20 kV sous Lipowerline.....	47
Figure 37: Ligne électrique 90 kV un passage issu de Lipowerline.....	47
Figure 38: Arbre proche des lignes électriques.....	47
Figure 39 : Ancien logo 3DReshaper et nouveau logo de Cyclone 3DR.....	49
Figure 40: Classification du nuage de point issu de Cyclone3DR.....	50
Figure 41: Isolant issu du RTC 360 (À Gauche) Isolant issu du Lidar (À Droite) [Source personnel] .....	56
Figure 42: Nuage du scanner sous Cyclone 3DR.....	56
Figure 43: Nuage de point global de la zone classifié sous Global Mapper .....	57
Figure 44: Largeur de fauchée en fonction de la hauteur [Positics].....	68

Figure 45: Système d'amortissement du drone [Positics].....	69
Figure 46: Vue arrière du Lidar Vx-20 .....	69
Figure 47: Manoeuvre à effectuer pour initialiser l'IMU [Positics] .....	71
Figure 48 : Mesure du bras de levier du Lidar [Positics] .....	72

## Liste des tableaux

Tableau 1: Classification des valeurs au format las .....	15
Tableau 2: Répartition des points dans les différentes classes .....	40
Tableau 3: Répartition des points dans la travée 1 .....	45
Tableau 4: Répartition des points dans la travée 2 .....	46
Tableau 5: Récapitulatifs des avantages et inconvénients des logiciels .....	53
Tableau 6: Catégorie des drones .....	67
Tableau 7: Tableau de résolution des problèmes du Lidar [Positics] .....	74
Tableau 8: Bilan de l'analyse des méthodes .....	83

# Détection des câbles et pylônes électriques avec un drone équipé d'un capteur Lidar

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Le Mans 2021

---

## RESUME

L'acquisition de nuage de points via une révolution avec le développement des lidars aéroportés dans le domaine du géomètre. La détection des lignes électriques est quant à elle lente et fastidieuse, ainsi le lidar aéroporté peut-être une solution à ce problème.

L'objectif de ce Travail de Fin d'Etude est d'automatiser au maximum la détection de lignes électriques dans le nuage de points. Pour cela plusieurs acquisitions ont été réalisées avec des lignes de hauteurs et courbures différentes. Nous avons réalisé des traitements sous les logiciels Global Mapper, Lipowerline et Cyclone 3DR possédant chacun des routines de traitements propres.

Ces traitements apportent des résultats disparates suivant les logiciels avec chacun ses avantages et inconvénients. Une comparaison est effectuée avec un scanner statique considéré comme référence par sa précision. Le lidar est un outil révolutionnaire pouvant intervenir sur différents chantiers de Bbass.

**Mots clés : Lasergrammétrie, Drone, Global Mapper, Lipowerline, Cyclone 3DR, Segmentation, Classification.**

---

## SUMMARY

The acquisition of point cloud is a revolution with the development of airborne lidar in the world of surveyor. Detection of power lines is slow, and tedious also airborne lidar may be a viable solution to this problem.

The aim of this End of Study Work is to automate the detection of power lines in the point cloud as much as possible. For this, several acquisitions were made with lines of different heights and curvatures. We performed treatments using Global Mapper, Lipowerline and Cyclone 3DR software, each with its own treatment routines.

These treatments bring disparate results depending on the software, each with its advantages and disadvantages. A comparison is made with a static scanner considered as a reference for its accuracy. Lidar is a revolutionary tool that can be used on various Bbass sites.

**Key words: Lasergrammetry, Drone, Global Mapper, Lipowerline, Cyclone 3DR, Segmentation, Classification.**