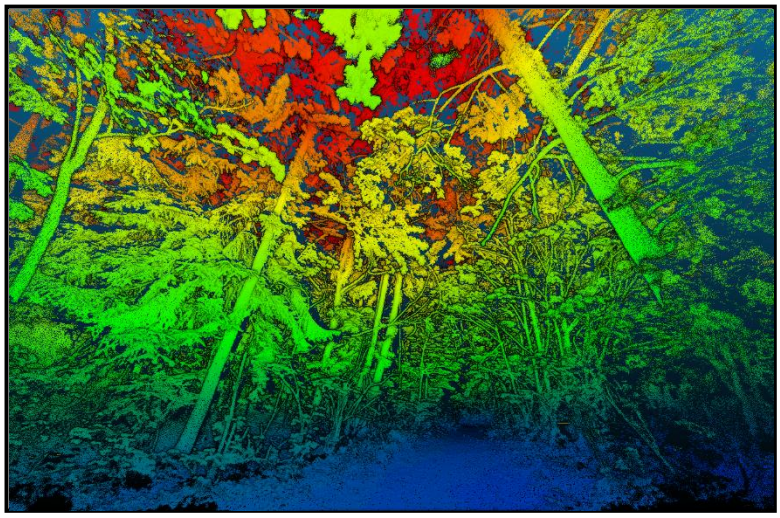
UNIL | Université de Lausanne
Faculté des géosciences
et de l'environnement

Master of Science in Environmental Science

Méthode d'acquisition de données pour le lidar low-cost VLP-16 Puck de Velodyne : densification et assemblage de nuages de points

Jason Bula

Sous la direction du Prof. Grégoire Mariéthoz (IDYST, UNIL)



Juillet - 2019

Maîtrise universitaire ès sciences en sciences de l'environnement
Secrétariat du Master MSc | www.unil.ch/masterenvi

« Ce travail n'a pas été rédigé en vue d'une publication, d'une édition ou diffusion. Son format et tout ou partie de son contenu répondent donc à cet état de fait. Les contenus n'engagent pas l'Université de Lausanne. Ce travail n'en est pas moins soumis aux règles sur le droit d'auteur. A ce titre, les citations tirées du présent Mémoire ne sont autorisées que dans la mesure où la source et le nom de l'auteur·e sont clairement cités. La loi fédérale sur le droit d'auteur est en outre applicable. »

Image : Nuage de points représentant un milieu forestier à quelques kilomètres de Crissier en Suisse avec en couleur l'altitude relative au système lidar.

Remerciements

En préambule de ce projet de Master, je souhaite remercier tout particulièrement :

- Mon directeur de mémoire **Prof. Grégoire Mariéthoz** pour sa grande expérience et son expertise dans le domaine de la télédétection, pour son accessibilité et sa disponibilité ainsi que pour l'excellente collaboration que nous avons eue tout au long du projet et pendant les moments d'assistanat.

- L'expert **Dr. Marc-Henry Derron** pour son intérêt dans le projet et le temps investi dans la lecture et la procédure d'évaluation.

- Le doctorant **Lionel Benoit** pour son aide à la réflexion et pour la compréhension de la géométrie des images acquises au lidar.

- **Aurélien Ballu** pour l'emprunt du matériel ainsi que pour la modification et l'ajustement du trépied.

- Léonard Cornuz et Tristan Liardon pour leurs connaissances et conseils en spéléologie. Jules Raymond et Julien Chevaley, pour m'avoir accompagné dans les mines de Baulmes ainsi que pour leurs conseils et pour leur assistance technique pendant les levés.

- Les membres de l'AEGE pour leur soutien et tous les moments exceptionnels passés ensemble cette année. Un grand merci à Nelia Franchina pour son aide précieuse pendant la rédaction du travail et tout au long du semestre.

- Julie Guenat pour ses corrections et conseils avisés.

- Mes parents pour leurs encouragements et pour la relecture du travail.

Merci beaucoup !

Résumé :

Le développement des techniques d'acquisition de données trois dimentions (3D) résulte de la combinaison entre le perfectionnement des capteurs et l'élaboration de nouveaux vecteurs facilitant la prise de mesures. Le lidar, (Light Detection And Ranging) est une technologie récente permettant l'acquisition précise de mesures à partir du temps de parcours d'un signal laser. Malgré leur potentiel certain, les lidars restent une technologie trop peu servie de par leur coût élevé.

Cette étude développe une méthode pour lidar terrestre statique permettant l'utilisation efficace des données produites par un lidar low-cost, le VLP-16 de Velodyne (portée de 100 m), en s'affranchissant de tout matériel onéreux (GPS différentiel, IMU high-cost). Dans un premier temps, une densification du nuage de points pour générer des scans de haute résolution a été effectuée. Dans un deuxième temps, des assemblages de différents scans ont été réalisés en utilisant un algorithme d'alignement (ICP).

Le système lidar élaboré a été confectionné à l'aide d'un moteur permettant l'augmentation de la résolution spatiale des scans. Cet ajout a nécessité une calibration en post-traitement pour chaque scan effectué. L'acquisition et le traitement des scans ont permis la modélisation de l'intérieur d'un bâtiment, d'anciennes mines et d'un milieu forestier. Cette étude a mis en évidence les difficultés que présentent ces trois environnements bien que la densification et les assemblages soient prometteurs. Finalement, le système lidar a été comparé au GeoSLAM, un système lidar mobile de courte portée utilisant un algorithme SLAM. L'alignement entre les deux scans est d'une distance de ±2 cm.

Cette étude a ainsi démontré que les systèmes lidars permettant une production de données élevée et précise peuvent être développés à moindre coût.

Mots-clés :

Scanner lidar terrestre, Velodyne VLP-16, low-cost, nuage de points, densification, calibration, alignement, assemblage, algorithme ICP, sous-échantillonnage, référencement

Summary :

The development of 3D data acquisition techniques is the result of the combination of the sensor enhancements and the development of new platforms. These factors play an important role to facilitate the measurement. The lidar (light Detection And Ranging) is a new technology to acquire accurate data by measuring the travel time of the laser pulse. Despite their significant potential, lidars are underused tools due to their high cost.

This study aims at developping a method for terrestrial laser scanner (TLS) that finds a way to effectively use the data produced by the lidar system (The VLP-16 of Velodyne with a range of 100 m), by avoiding the use of expensive equipment (differential GPS, high-cost IMU). First, a densification of the point cloud to produce a high-resolution scan was performed. Second, a registration based on the iterative closest point (ICP) model was achieved.

A motor was used to change the scan direction and led to a significant increase in the scan spatial resolution. Adding the motor required a post-treatment calibration for every new scan. A building has been scanned from the inside as well as former mines and a forest environment. This study noted the difficulties in thoses environments, although the densification and the registration looks promising. Finalely the lidar system has been compared to another system based on a registration with a SLAM algorithm. The alignment between those two scan is a distance of ±2 cm.

This study found that lidar system allows a high production of accurate data and can be used in a low-cost way.

Key words :

Terrestrial laser scanner (TLS), Velodyne VLP-16, low-cost, point cloud, densification, calibration, registration, alignment, ICP algorithm, downsampling, referencing

Table des matières

1. Introduction 7
2. État de la recherche 10
2.1 Lidar : Light Detection And Ranging 10
2.1.1 Mode de fonctionnement 10
2.1.2 Retour multiple 11
2.1.3 Les types d'erreurs produites par les lidars 12
2.2 Planification d'un levé 13
2.2.1 Lidar aéroporté 13
2.2.2 Lidar terrestre 14
2.3 Algorithme d'alignement : Iterative Closest Point (ICP) 16
3. Méthodologie 18
3.1 Création d'un système lidar terrestre 18
3.1.1 Caractéristiques du VLP-16 de Velodyne 20
3.1.2 Caractéristiques du moteur 20
3.1.3 Caractéristiques de la rotule 21
3.1.4 Caractéristiques du trépied 21
3.1.5 Caractéristiques du contrepoids 21
3.1.6 Caractéristiques de l'alimentation 21
3.2 Comparaison avec un système d'alignement SLAM 22
3.3 Choix des logiciels 22
3.3.1 Veloview 22
3.3.2 Matlab 22
3.3.3 CloudCompare 23
3.4 Installation du système sur le terrain 23
3.5 Post-traitement des données 25
3.5.1 Initialisation des paramètres 25
3.5.2 Transformation et réalignement des images 25
3.5.3 Sous-échantillonnage 27
3.5.4 Réduction du bruit 27
3.5.5 Calibration du système lidar terrestre 28
3.5.6 : Évaluation des effets de la calibration et de la performance du système 30
3.6 Assemblage de nuage de points 31
3.7 Test du système dans différents environnements 33
3.7.1 Bâtiment Géopolis 33
3.7.2 Mines de Baulmes 33
3.7.3 Milieu forestier 34

3.8 Comparaison avec le Géoslam 34
3.8.1 Évaluation de la distance 34
4. Résultats 35
4.1 Calibration du lidar 35
4.1.1 : Visualisation des effets de la calibration 35
4.1.2 Effets de la calibration par rapport à un plan théorique 37
4.1.3 Evaluation de la distance entre deux scènes identiques 38
4.1.4 Mise en évidence de l'artéfact produit par le lidar 39
4.2 Assemblage de scans dans le Géopolis 40
4.2.1 Qualité des scans 40
4.2.2 Assemblage dans le Géopolis 42
4.3 Assemblages aux mines de Baulmes 44
4.3.1 Qualité des scans 44
4.3.2 Assemblage des scans 45
4.3 Assemblage en forêt 49
5. Discussion 53
5.1 Calibration 53
5.1.1 Répartition des données non calibrées 53
5.1.2 Répartition des données calibrées 54
5.1.3 Erreur à proximité du système : origine de l'artéfact 55
5.2 Performances 56
5.3.1 Stabilité du système 56
5.3 Assemblage des nuages de points 57
5.3.1 Assemblage dans le Géopolis 57
5.3.2 Assemblage dans les mines de Baulmes 58
5.3.3 Assemblage dans un milieu forestier 58
5.4 Comparaison Geoslam dans le Géopolis 59
6. Conclusion 60
7. Bibliographie 61
8. Annexes 65

1. Introduction

Le développement des techniques d'acquisition de données 3D résulte de la combinaison entre le perfectionnement des capteurs et l'élaboration de nouveaux vecteurs facilitant la prise de mesures. Jusque dans les années 60, le capteur le plus populaire était l'appareil photo permettant une acquisition instantanée d'un environnement. Par l'utilisation des principes de stéréoscopie, la cartographie de terrain à partir de photos aériennes a été facilitée (Henry, 1954).

Traditionnellement, la plupart des techniques de vision par ordinateur reposaient sur des images 2D (Mada *et al.,* 2003). La recherche et l'avancée technologique dans l'élaboration de différents types de capteurs ont engendré une augmentation conséquente de la production de données 3D permettant d'offrir une source d'informations plus riches et moins abstraites (Pouliot, 2018). Le développement de nouvelles plateformes telles que les satellites en 1959 avec CORONA, l'un des premiers satellites d'imagerie (Altmaier et Samarasekera, 2002) a permis l'éloignement physique entre les capteurs et leurs cibles pour ainsi effectuer des mesures de surfaces beaucoup plus étendues. Le lancement de satellites équipés de capteurs de plus en plus performants a continué jusqu'à aujourd'hui. À ce jour, 4'987 satellites artificiels sont en orbite autour de la Terre (Andy, 2019) récoltant tout type de données. Plus récemment, l'avènement des drones dans les années 2000 (Kumar *et al*., 2000) a provoqué un grand boom dans les techniques d'acquisition de données à distance (Everaerts, 2008; Colomina et Molina 2014; Nex et Remondino, 2014). La facilité d'acquisition a entrainé l'augmentation de la production de données 3D.

En ce qui concerne les capteurs permettant l'acquisition d'informations, nous pouvons citer deux grandes catégories qui sont respectivement les capteurs passifs et les capteurs actifs (Mada *et al*., 2003). Un capteur passif n'émet aucune énergie et mesure directement ce qui est réfléchi par l'objet pour reproduire une image de celui-ci, ils ont donc besoin d'un apport extérieur d'énergie pour fonctionner. Un capteur actif envoie un signal en direction de l'objet qui est renvoyé en direction du capteur. À partir de cette information, il est possible de reproduire un modèle de l'objet (Mariéthoz, 2019).

Les principaux capteurs passifs sont l'appareil photo comme mentionné précédemment, mais nous pouvons aussi citer le gyroscope ou encore les capteurs magnétiques qui mesurent l'intensité de l'énergie émise par un objet, issue d'une source extérieure. Comme principaux capteurs actifs, nous pouvons citer les techniques de géophysique (radar à pénétration de sol, magnétotellurisme, géoélectromagnétisme, etc.), l'imagerie Sonar qui mesure le temps de parcours des ondes acoustiques pour la cartographie sous-marine, le radar (RAdio Detection And Ranging) mesurant le temps de parcours des ondes produites par un oscillateur radio (Daniel et Larouche, 2018) et enfin le lidar (LIght Detection And Ranging) qui sera l'objet de ce travail.

Les lidars sont des appareils puissants permettant de mesurer les distances avec une haute précision ce qui en fait d'excellents outils dans de nombreux domaines (Pouliot, 2018). Malgré leur potentiel certain, les lidars restent une technologie trop peu servie. Cela s'explique par le coût élevé d'une acquisition au lidar. En plus du prix de l'instrument, un dispositif accompagnant la plateforme est souvent utilisé pour permettre un référencement des données (par exemple un GPS différentiel) ou une correction géométrique pour les lidars terrestres mobiles (station inertielle et DMI) ce qui rend l'acquisition de données lidar moins abordables d'un point de vue financier (Daniel et Larouche, 2018). Il devient donc de plus en plus intéressant d'étudier les alternatives moins onéreuses en ce qui concerne l'utilisation des techniques d'acquisition 3D.

Depuis quelques années de nouveaux modèles de lidars beaucoup plus compacts et meilleur marché ont été élaborés. Ces capteurs low-cost ont généralement des performances limitées en comparaison à des modèles traditionnels, mais sont très prometteurs en termes d'efficacité (Wang *et al.*, 2018). Souvent très légers, il est devenu possible de fixer ces lidars sur de nouveaux vecteurs comme les drones ou sur un système embarqué par l'utilisateur. La figure 1 montre une liste comparative non exhaustive de ce qui peut être trouvé sur le marché. Ces capteurs lidars présentent des portées allant de 20m à plus de 300m pour les plus puissants, pour un poids généralement en dessous du kilogramme. Bien qu'il s'agisse de modèles low-cost, la précision de ces capteurs est la plupart du temps centimétrique.

Dans cette étude, un système de lidar terrestre low-cost fourni par l'université de Lausanne a été utilisé. Il s'agit du Velodyne Puck VLP-16, un lidar de petite taille comprenant 16 canaux de mesures, une portée de 100m ainsi qu'une exactitude de ±3 cm. Ce lidar permet une acquisition à une résolution horizontale de 0.2° et une résolution verticale allant jusqu'à 2.0° (Velodyne, 2018). Deux configurations sont possibles : la première comprend une acquisition de 300'000 points par seconde pour un seul retour, la seconde comprend une acquisition de 600'000 points par seconde pour un enregistrement de deux retours. Le VLP-16 permet aussi de mesurer l'intensité du signal retourné (Velodyne, 2018).

L'objectif cette étude vise à développer une méthode permettant l'utilisation efficace des données produites par le lidar low-cost en s'affranchissant de tout matériel onéreux. Une utilisation de GPS différentiel ou autre matériel high-cost sera donc évité. Dans un premier temps, une densification du nuage de points pour générer des scans de haute résolution sera effectuée. Dans un deuxième temps, des assemblages de différents scans seront effectués en utilisant un algorithme d'alignement (ICP).

Manufacturer	LiDAR	Horizontal FOV	Min. Range	Max Range	Distance Resolution	Scan Rate	Interface	Hor. Angular Resolution	Vertical FOV	Power	Voltage	Mass	Size
IBEO Automotive	Features: Long Range, Multi-Echo, Embedded Object Tracking/Classification, Automotive Quality, IP69K. Custom Sensor "Fusion" Systems Are Available. Tracks Up To 64 Objects @ 6.25 Hz.												
	IBEO LUX 8 Layer	110° (50° to -60°)	<0.3m	200m (90%)	4cm	6.25Hz, 12.5Hz, 25Hz	Ethernet, CAN	Up to 0.125°	6.4°	8W Avg., <10W Max	9V-27V	~1kg	W164.4mm x D93.2mm x H88mm
IBEO Automotive	Features: Long Range, Multi-Echo, Embedded Object Tracking/Classification, Automotive Quality, IP69K. Custom Sensor "Fusion" Systems Are Available. Greater Than 30 Tracks.												
	IBEO SCALA B2	145° (4L)	<0.3m	327m (100%)	4cm	25Hz	CAN, BroadR-Reach/Eth-ernet	0.25°	3.2°	<7W	9V-16V	510g	W108mm x D100mm x H60mm
Hokuyo	Features: Long Distance Laser Range Finder. Available for Outdoor Use Because Of 100,000 LUX for Ambient Illuminance and IP64 For Protective Structure.												
	UTM-30LX-EW	270°	0.1m	80m (90%)	0.1-10m, ±3cm 10-30m, ±5cm	40Hz	Ethernet	0.25°	N/A	8W	12V ± 10%	210g	W60mm x D60mm x H87mm
Hokuyo	Features: Outdoor Laser Range Finder, Multi-Echo Detection Ideal for Outdoor Applications. Performs Well in Rain, Snow, Mist and Dust. IP67.												
	UXM-30LX-EW	190°	0.1m	80m (90%)	0.1-10m, ±5cm 10-30m, ±10cm	20Hz	Ethernet	0.25°	N/A	6W Avg, 18W Max	10V-30V	~550g	124mm x 126mm x 150mm
Leddartech	Features: Lightweight and Robust. Rapid Refresh Rate. Flexible Integration and Customization. Other Lens Options Available for Wider FOV.												
	Vu8-020	20°		60m (90%)	1cm	Up to 100Hz	SPI or USB, CAN, UART, RS-485	2.5°	0.3° to 3.0°	2W	12V	110g	70mm x 35.2mm x 67.5mm
Ocular	Features: Robust and Lightweight Device with A Simple Power and Ethernet Interface. 3 Scanning Modes: Full Field, Bounded Elevation, And Region Scanning. Max Elevation Rate of 3Hz.												
	RE05	360°		160m (100%)	N/A	15 Hz Hori-zontal, 3Hz Vertical	Ethernet	Variable	±35°	50W	24V	IP65 2.8kg, IP67 3.0kg	

Manufacturer	LiDAR	Horizontal FOV	Min. Range	Max Range	Distance Reso-lution	Scan Rate	Interface	Hor. Angular Resolution	Vertical FOV	Power	Voltage	Mass	Size
Velodyne	Features: Lightweight, 360° FOV, 3D Point Clouds Ideal for Mapping and Autonomous Applications.												
	LiDAR PUCK	360°	1m	100m		5Hz-20Hz	100Mbps Ethernet	0.2° @ 10Hz	15° to -15°	8W	9V-32V	830g	H72mm x Diam 103mm
	LiDAR PUCK Lite											590g	
Triple-IN	Features: 2D Pulse Scanner. Long Range with Very High Accuracy in Range and Angle. IP67.												
	PS150-270	270°	0.8m	160m	1mm	5Hz - 20Hz	Ethernet, RS232, Discrete Switching Outputs	0.045° to 0.18°	N/A	8W	24V ± 5V	2.6g	260mm x 123.6mm x 130mm
	PS250-270		2.0m	200m									
Neptec	Features: Designed for Harsh Environments. Both Conical and Panoramic FOV. Very Long Range.												
	OPAL 3 Conical	45°, 60°, 120°		500m or 1000m (20%)		Contact Us	GigE	Rosette Type Over-lapping Pattern	45°, 60°, 120°	110W (250W Max)	18V-36V	<12.7 kg	178mm x 178mm x 338mm
	OPAL 3 Panoramic	360°							5° to -40°			<13.2 kg	178mm x 178mm x 456 mm
SICK	Features: Short Range, Outdoor, 20m. IP67. With Integrated Heater.												
	LMS 111	270°	0.5m	20m		50Hz, 25Hz	Ethernet, RS232	0.25°-0.5°	N/A	8W (35W w/ Heat)	10.8V-30V	1.1kg	105mm x 102mm x 162mm
	LMS 151		0.5m	50m									
SICK	Features: 3D LiDAR With A Gap-Free Detection Across 24 Scanning Layers. IP65 And IP67.												
	MRS 6000	120°	0.5m	75m (90%)		10Hz	Ethernet	0.13° (Horizontal) 0.625° (Vertical)	15°	20W	10V-29V	2.2kg	125.5mm x 176mm x 131mm
SICK	Features: SICK's Smallest 2D LiDAR Sensor with The Highest Accuracy in Its Class. Lite Option Available. IP67.												
	LMS 511 PRO	190°	0.5m	40m	±25mm (1m-10m), ±35mm (10m-20m), ±50mm (20m-30m)	25Hz-100Hz	Ethernet, RS232	0.167° to 1°		22W (+55W for Heat)	24V	3.7kg	160mm x 155mm x 185mm
Disclaimer: Specifications Are Subject to Change, Without Notice.													

Figure 1 : Comparaison des caractéristiques des différents capteurs lidar low-cost vendus sur le marchés selon Autonomoustuff, 2018.

2. État de la recherche

2.1 Lidar : Light Detection And Ranging

Les premiers lidars (lidars à cible diffuse) ont vu le jour à la fin des années 1960. D'abord utilisés pour des observations météorologiques comme la caractérisation des nuages (Northend *et al,*. 1966; Davis, 1969) ou la quantification d'aérosols dans l'atmosphère (Schuster, 1970), les lidars ont ensuite été développés pour la mesure de cibles dures (Ackermann, 1999). C'est dans les années 1970 que la NASA élabore de nouveaux modèles pour l'armée américaine et le Canada (Ackermann, 1999). Ces systèmes avaient pour but la création de modèles numériques de terrain et de surface. Placés à bord d'avions, les premiers systèmes récoltaient des données d'élévation pour de la surveillance (Krabill, 1980). Le premier avantage était la possibilité d'obtenir une précision verticale très haute (Ma, 2005). Les premiers lidars terrestres étaient quant à eux utilisés en parallèle avec un théodolite pour mesurer précisément l'angle de visée (Shan et Toth, 2018).

À ce jour, le capteur lidar est probablement la technologie la plus efficace pour l'acquisition de données topographiques (Shan et Toth, 2018).

2.1.1 Mode de fonctionnement

Les lidars sont pourvus de détecteurs laser capables de mesurer la distance avec un degré de précision très élevé. Un laser (acronyme the Light Amplification Stimulated Emission of Radiation) produit et émet une onde monochromique de radiation dans une direction précise (Shan et Toth, 2018). Une très courte, mais intense impulsion laser permet de viser un objet. Une fois le signal réfléchi sur l'objet, il retourne en direction du capteur qui va mesurer précisément l'intervalle de temps écoulé entre l'émission et la réception. La figure 2 schématise le fonctionnement du lidar, l'équation 1 relie le temps de parcours du signal laser (t), la vitesse de la lumière (v), à la distance de l'objet visé au capteur (R).

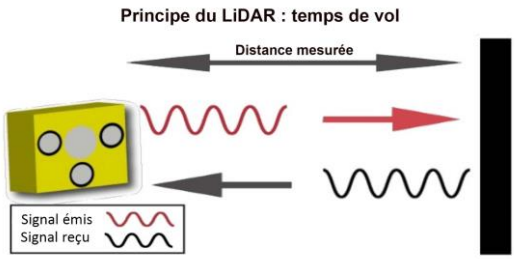


Figure 2 : Illustration du principe du temps de vol pour l'acquisition de données lidars d'après Shan et Toth, 2018 (modifié par Jason Bula, 2019)

$$R = \frac{v*t}{2} \qquad [1]$$

Comme la distance mesurée est directement proportionnelle au temps de parcours de l'onde, il est important d'avoir un système permettant une mesure très précise de ce temps. Lors de l'émission et la réception de l'impulsion, la diode présente dans le système détermine lorsque le compteur de temps s'active et s'arrête (Shan et Toth, 2018).

Lorsque la tension générée par la diode atteint une valeur seuil prédéterminée, le chronomètre s'active. Ce seuil varie selon le type de capteur (figure 3).

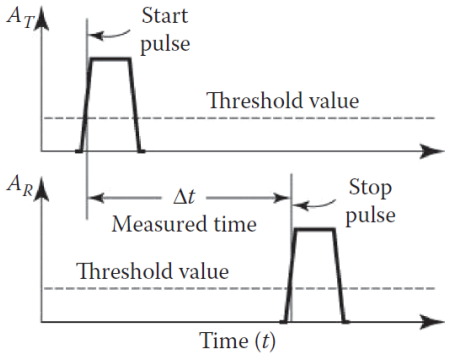


Figure 3 : Digramme représentant le début et la fin du pulse pour contrôler le chronomètre (Shan et Toth, 2018)

2.1.2 Retour multiple

Le retour du signal émis peut varier selon la surface. Par exemple, une surface à haute réflectivité impliquera un signal retour intense, contrairement à une surface plus complexe comme par exemple de la végétation (Daniel et Larouche, 2018). Certains lidars ont la possibilité de décomposer l'onde du signal retour, afin de comprendre la structure de la surface visée. Traditionnellement, les lidars ne sont capables de collecter qu'un seul signal retour (Yin *et al.*, 2014). Bon nombre de lidars peuvent capter plusieurs signaux retours, jusqu'à 15 pour les derniers modèles de Riegl (RIEGL Laser Measurement Systems, 2019). Le premier retour du signal correspond au premier pic d'intensité capté par le lidar. Les pics suivants correspondent aux différentes cibles se trouvant derrière le premier obstacle. La figure 4 montre l'intensité du signal reçu par un capteur en fonction du temps, dans l'exemple d'un scan d'une surface boisée. Ainsi, il existe différents pics d'intensité correspondant à la hauteur des arbres que le laser traverse. Le dernier pic correspond donc en théorie au sol.

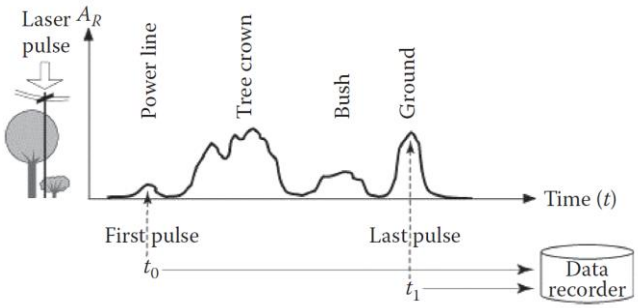


Figure 4 : Illustration des différents retours lors d'un scan d'une surface boisée d'après Petrie et Toth, 2008

Il faut toutefois prendre en considération le fait qu'il existe une distance minimale entre deux pics d'intensité. La distance minimale entre deux retours est commandée par ; (i) la quantité d'énergie que peut produire le capteur et (ii) la fréquence d'opération du capteur (Shan et Toth, 2018).

Le nombre de retours du signal laser est généralement utilisé pour l'élaboration de modèles numériques de terrain et de modèles numériques de surface. En sélectionnant essentiellement les

points appartenant au sol, il est possible d'obtenir un modèle précis de la topographie. Étant donné que le dernier retour du signal ne correspond pas toujours à un point appartenant au sol, divers algorithmes ont été créés afin de pouvoir catégoriser les points. La plupart de ces filtres sont basés sur l'hypothèse que les variations de pente sur un terrain sont graduelles et non abruptes (Meng *et al.*,2009). Ainsi, l'étude des différentes altitudes locales peut permettre de distinguer si un point appartient au sol ou non. Par la suite, diverses méthodes de filtrage basées sur des régressions linéaires, sur la pente et sur la morphologie du terrain sont mises en application afin de produire un modèle numérique de terrain (Wang et Tseng, 2010).

Le premier retour du scanner permet l'élaboration de modèles numériques de surface. L'utilisation de capteurs à grande divergence de signal laser permet d'élargir l'empreinte et donc d'obtenir une plus grande gamme de premiers retours facilitant l'élaboration de modèles numériques de surface (Korhonen *et al.*, 2011) tout en réduisant la densité de points. Ainsi, l'utilisation des multiples retours du signal est très utilisée en foresterie où la quantification de stock de bois peut être facilement mesurée (McRoberts. 2013; Vashum et Kayakumar, 2012; Korhonen *et al.*, 2011).

2.1.3 Les types d'erreurs produites par les lidars

Malgré la haute précision du lidar, certaines erreurs de mesures peuvent survenir. Tout d'abord, il existe une incertitude liée à l'influence de la divergence du faisceau. En effet, un point capté comporterait une erreur d'environ ¼ du diamètre du faisceau laser (Lichti et Gordon, 2004). Les erreurs de délimitation d'objet peuvent aussi intervenir. Dans le cas où le faisceau laser se trouverait sur une arête comme le montre la figure 5, les coordonnées du point seront basées sur des temps de parcours de l'onde potentiellement variable ce qui aura pour conséquence une mauvaise estimation du point mesuré (Lerma *et al.,* 2010).

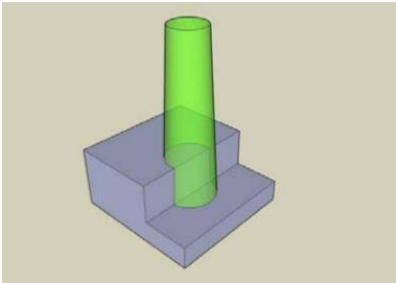


Figure 5 : Exemple d'erreur de mesure produite par le faisceau laser du lidar (Lerma et al., 2010)

De nombreux scanneurs lidars sont équipés de miroirs rotatifs permettant d'orienter le faisceau laser dans la direction souhaitée. Il est nécessaire de connaitre exactement l'orientation de ce miroir pendant une acquisition de données, car un léger écart implique d'importantes erreurs de mesures (Lichti et Gordon, 2004).

Étant donné que le lidar opère sur une certaine longueur d'onde qui peut varier selon le type de capteur, il est possible que le signal retourné ne soit pas suffisamment intense après le contact avec l'objet visé (réflexion lambertienne), ce qui peut poser problème selon l'application (Petrie et Torh, 2008). De même pour les surfaces comprenant des réflectivités très importantes où le signal serait dévié (réflexion spéculaire). Le type de matériau scanné peut aussi influencer la trajectoire de l'onde (Daniel et Larouche, 2018).

Finalement, les capteurs lidars vont être relativement sensibles aux rayonnements solaires qui peuvent brouiller le signal retour. Néanmoins, divers algorithmes permettant de filtrer l'effet du rayonnement solaire peuvent être appliqués en post-traitement moyennant une perte de qualité du résultat (Han *et al.,* 2017).

2.2 Planification d'un levé

Le domaine d'application des lidars est très vaste, le nombre d'applications en est presque infini. C'est pourquoi il est important d'optimiser la méthode qui sera utilisée pour effectuer une acquisition de données la plus appropriée. Pour la planification d'un projet, il faut évaluer les différents paramètres qui vont déduire de quelle manière les mesures vont être réalisées. Par exemple la résolution du produit fini, la surface à mesurer, et l'accessibilité du terrain d'étude seront déterminantes pour le choix du capteur ainsi que de la plateforme sur laquelle le capteur prendra des mesures.

2.2.1 Lidar aéroporté

Pour la mesure de grandes surfaces à résolution moyenne ou faible, le lidar aéroporté sera la meilleure alternative. Des lignes de vol sont effectuées afin de recouvrir la totalité de la surface. L'altitude de la plateforme ainsi que l'ouverture du capteur lidar vont définir la largeur de la fauchée. L'annexe 1 montre un exemple de planification de levé par lidar aéroporté avec différentes vitesses et altitudes de vol pour le système Riegl VQ780i.

La planification doit se faire en fonction des caractéristiques du capteur. Une fréquence d'acquisition de données élevée permet d'obtenir davantage de retours du signal, ou permet d'obtenir plus de données et donc de réduire le coût des mesures. Le choix du type de mécanisme pour le miroir rotationnel du lidar doit aussi être pris en compte en fonction de la répartition des données de sortie souhaitée. La figure 6 illustre l'empreinte au sol du laser selon 3 mécanismes différents.

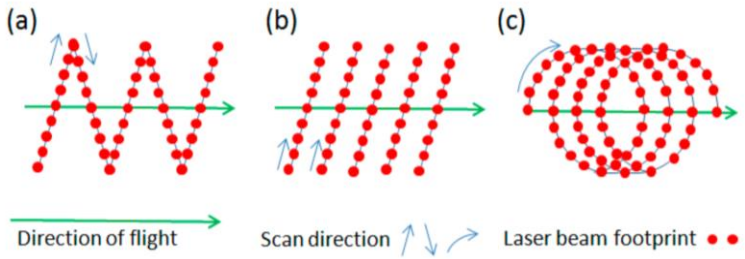


Figure 6 : Représentation de l'empreinte au sol du laser en fonction des mécanismes des scanneurs. En (a), lidar à miroir oscillant, en (b) lidar à polygones rotationnels, en (c) balayage Palmer (Fernandez-Diaz et al., 2014)

Les premiers systèmes lidar aéroportés permettaient de connaitre relativement précisément l'altitude de vol, mais la position horizontale était encore difficile à obtenir (Krabill et Martin, 1987). Depuis, l'utilisation de GPS différentiel a permis une nette amélioration de la qualité des données lidar aéroporté. De plus, des stations inertielles (IMU) permettant d'actualiser le positionnement exact de la plateforme (intégration du roulis, tangage et lacet) ont permis une estimation plus précise de la trajectoire (Shih *et al.,* 2008). La figure 7 montre les différents instruments nécessaires permettant, une fois synchronisés entre eux, de référencer précisément les données acquises.

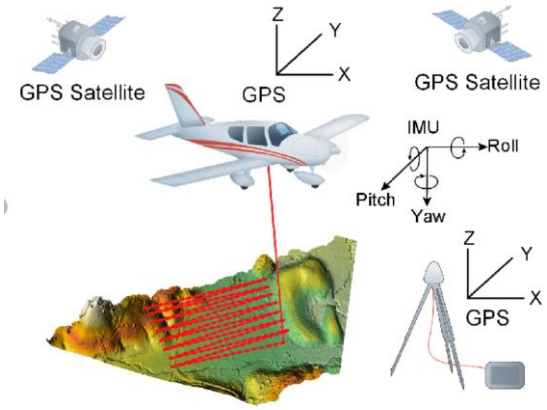


Figure 7 : Illustration du roulis, tangage et lacet pendant la prise de mesures et sa correction avec une station inertielle et un GPS pendant une acquisition au lidar aéroporté (Shih et al., 2008).

Concernant le coût de la donnée lidar aéroporté, celui-ci est fortement dépendant de la densité de points au mètre carré et de la surface à couvrir. Ce coût reste très élevé selon les projets, mais baisse au fil des années. Pour exemple, une acquisition au lidar aéroporté régional au Canada est passé de 220 CHF par km^2 à une densité de points de 2 pts par m^2 à 30CHF entre 2005 et 2015 (Pouliot, 2018). Selon les applications, ce coût peut être davantage baissés en utilisant des solutions de lidars aéroportés sur drone. A titre de comparaison, en Arizona un levé lidar par drone reviendrait à 38CHF par hectare pour une densité de points de 50 pts/m^2 contre 1000CHF par hectare pour une densité de points de 15 pts/m^2 effectué par avion (Sankey *et al.,* 2018). Les levés effectués par avion restent toutefois plus efficaces pour de grandes surface ne requérant pas de forte densité de points.

2.2.2 Lidar terrestre

Selon l'application, les systèmes de lidar terrestre peuvent être statiques ou mobiles. Les scanneurs lidars terrestres statiques sont généralement utilisés pour la modélisation à très haute résolution d'objets. L'ingénierie, le transport et l'urbanisme en ont le plus bénéficié (Barnea et Filin, 2008). La modélisation précise et la surveillance d'ouvrages de génie civil (ponts, barrages, viaducs), ou encore la gestion de dangers environnementaux comme les glissements de terrain ou chutes de pierres (Jaboyedoff *et al*., 2011, 2012; Royán *et al.,* 2014; Teza *et al.,* 2007) est devenue beaucoup plus accessible. Les systèmes lidars terrestres mobiles sont principalement utilisés pour les levés le long des corridors routiers. Ces systèmes sont généralement composés de plusieurs scanneurs lidars, les plus performants permettent une précision planimétrique de 2 cm et 5 cm de précision altimétrique (Larouche *et al.,* 2018).

Que ce soit dans l'utilisation de systèmes lidars terrestres statiques ou mobiles, le plus grand challenge est de pouvoir aligner, ou superposer plusieurs nuages de points. Pour cela, un référencement du nuage de points peut s'effectuer à l'aide de stations GPS différentielles. Cependant, il arrive que la précision des coordonnées GPS fournies par ces systèmes soit fortement influencée par les potentielles obstructions (Zimbelman et Keefe, 2018). Dans le cas d'une acquisition de données en milieu urbain, l'obstruction des bâtiments peut en effet interférer

la liaison entre les satellites et le système de lidar statique (Larouche *et al.,* 2018), tout comme un milieu forestier où la présence d'arbres peut obstruer le signal.

C'est pourquoi diverses techniques sont utilisées simultanément afin d'obtenir le meilleur alignement entre les nuages de points. L'utilisation de cibles, généralement des sphères à hautes réflectivités peuvent permettre un meilleur alignement (Daniel et Larouche, 2018). Ces cibles sont positionnées sur le terrain (idéalement relativement éloignées les unes des autres) de façon à être visibles sur l'ensemble des scans. En post-traitement, les centroïdes des cibles peuvent être extraits dans un logiciel approprié permettant ainsi de repositionner l'ensemble des scans. De ce fait, il est possible d'obtenir un assemblage de plusieurs scans. Dans le cas où les scans lidars ne sont pas effectués pendant la même campagne d'acquisition, par exemple pour de la surveillance de sites sujets à des dangers (glissement de terrain, surveillance de barrage), la superposition de différents scans doit s'effectuer d'une manière différente. Des points de correspondance fixes peuvent être retrouvés manuellement dans les différents scans et permettent leur alignement (Teza *et al.,* 2007). Cependant, cette méthode n'est pas toujours précise, d'autant plus que l'on ne peut pas avoir la certitude que les points de correspondance sont effectivement fixes. C'est pourquoi différents algorithmes permettant un référencement automatique sont aussi utilisés. L'algorithme ICP (Iterative Closest Point) procède par itération et essaie de minimiser la distance entre deux nuages de points (Jaboyedoff *et al.,* 2012; Teza *et al.,* 2007). Un scan de référence est fixé, le scan qui doit être aligné doit être transformé de manière rigide (translation et rotation). Les principes généraux de cet algorithme seront développés dans le chapitre suivant.

Pour le référencement de scans lidars mobiles, l'utilisation simultanée de différents capteurs est généralement favorisée. Ces capteurs comprennent les stations inertielles (IMU), caméras, ou autres instruments de mesure de distance (DMI). Ces instruments permettent d'enregistrer plus précisément la trajectoire de la plateforme dans le cas de perte de signal GNSS (Larouche *et al.,* 2018). Les principes d'ajustement de trajectoire sont relativement similaires à ceux utilisés pour le référencement de données lidars aéroportés. La figure 8 montre un véhicule équipé d'un système lidar et de différents capteurs permettant le référencement du nuage de points.

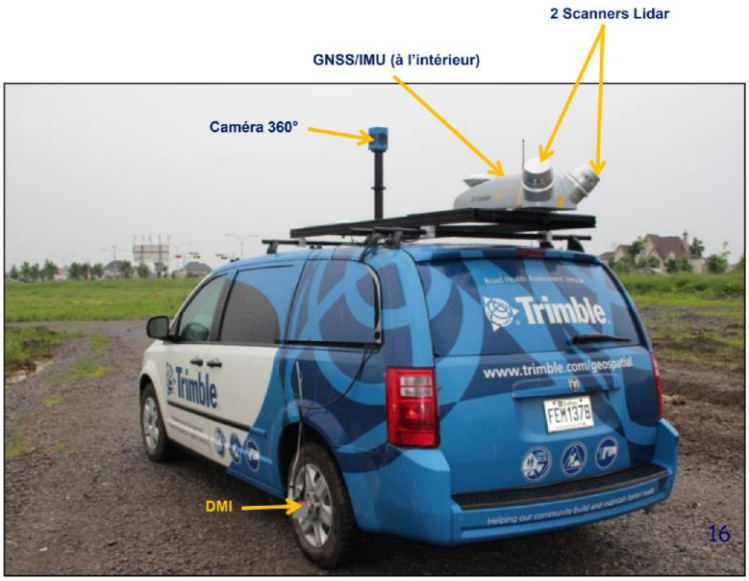


Figure 8 : Exemple d'un système lidar mobile terrestre (Daniel et Larouche, 2018)

Des algorithmes de positionnement automatique sont aussi utilisés pour le référencement en temps réel de la position de la plateforme. L'algorithme SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) permet au système de se repérer et ainsi de reconstruire son référentiel à partir des données collectées (Nobili *et al.,* 2015). Différents systèmes utilisent ce genre d'algorithmes, surtout en robotique où la géolocalisation du système peut se faire automatiquement. Cela a l'avantage de ne pas dépendre d'une connexion GNSS bien que celle-ci puisse améliorer la qualité du référencement et donc de pouvoir utiliser ces systèmes dans des milieux confinés, par exemple des grottes. Le système GeoSLAM qui sera testé dans ce travail permet ce genre d'application. Les algorithmes SLAM peuvent aussi être utilisés pour le référencement de nuages de points dans des systèmes de lidars aéroportés sur drones (Li *et al*., 2014).

2.3 Algorithme d'alignement : Iterative Closest Point (ICP)

L'algorithme ICP est la méthode la plus populaire permettant l'alignement de deux modèles en 3D de manière automatique. Le but principal est d'estimer la transformation rigide entre deux ensembles de nuages de points à partir de leurs géométries. Cette méthode a été publiée par Besl, P. J., & McKay en 1992. Plusieurs variantes ont ensuite été développées et ont permis une optimisation de l'efficacité de traitement (Rusinkiewicz et Levoy 2001). Elle utilise la recherche de voisins les plus proches afin de minimiser la distance entre les deux nuages de points. L'algorithme ICP peut se résumer en 5 étapes décrites ci-dessous selon Rusinkiewicz et Levoy, 2001.

1. Sélection des points : cette première étape consiste à déterminer un sous-ensemble de points appartenant à chacun des deux nuages de points ou objet 3D. La méthode de sélection peut varier selon le type d'algorithme. Par exemple, l'algorithme ICP proposé en 1992 par Besl, P. J., & McKay conserve tous les points des deux nuages contrairement à Masuda *et al.,* 1996 qui sélectionne les points de manières aléatoires tout comme l'algorithme qui sera utilisé dans ce travail.

2. Correspondance des points : cette seconde partie consiste à faire correspondre chaque point du premier ensemble aux points du second ensemble. Pour cela, la distance entre chacun des points est évaluée afin de déterminer la meilleure correspondance.

3. Évaluation du poids des paires : cette partie consiste à évaluer le poids attribué à chacune des paires créées à l'étape précédente. Le poids peut être soit constant sur l'ensemble des paires, ou alors peut varier selon la distance mesurée pendant la deuxième étape par exemple.

4. Rejet des paires : cette étape se rapproche de la précédente et consiste à définir les ensembles qui ne seront pas utilisés dans l'alignement des deux nuages de points. Différentes stratégies peuvent être mises en place comme la définition d'un seuil de distance à ne pas dépasser, la sélection d'un pourcentage de paires à conserver ou encore la suppression des paires comprenant une distance supérieure à l'écart-type de l'ensemble des distances comme décrit dans Masuda *et al.*, 1996.

5. Minimisation de l'erreur : cette dernière étape consiste à minimiser les distances entre les ensembles de nuages en appliquant une transformation rigide au nuage de points à comparer. La minimisation est habituellement effectuée par l'élaboration de distances quadratiques moyennes entre les ensembles de nuages de points (voir le chapitre 3.10.1).

Une fois ces cinq étapes terminées, l'algorithme effectue une nouvelle itération selon le même schéma jusqu'à obtenir une distance minimale entre les deux nuages de points définie selon un seuil ou un nombre d'itération à effectuer. La figure 9 illustre la méthode d'alignement ICP de deux lignes en deux dimensions.

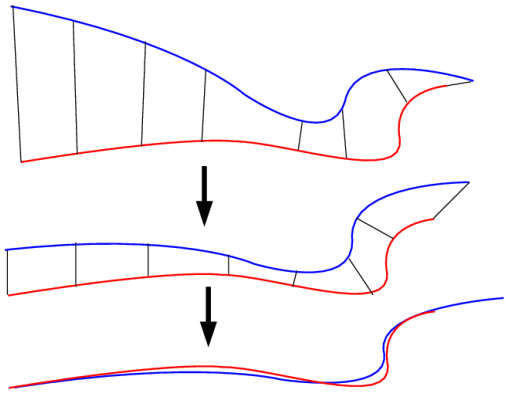


Figure 9 : Illustration de trois itérations d'un algorithme ICP appliqué à deux lignes en deux dimensions (d'après Smistad et al., 2015).

3. Méthodologie

3.1 Création d'un système lidar terrestre

Depuis ces dernières années, les capteurs lidars étaient limités à une seule ligne de scan sur un miroir rotationnel permettant ainsi d'effectuer des mesures sur un plan (Shakleton *et al.,* 2010). Les récentes recherches effectuées dans le domaine ont permis la production de modèles intégrant plusieurs lasers fixés sur une tête rotative. Cela permet au capteur de collecter davantage de données en comparaison à un modèle traditionnel. Le VLP-16 de Velodyne fait partie de ces nouveaux types de capteurs. Ce modèle compact a initialement été conçu pour la conduite automobile assistée (Geiger *et al.,* 2012).

Le VLP-16 étant un modèle low-cost de lidar, ses caractéristiques sont relativement limitées en comparaison avec un modèle high-cost. La figure 10 montre une image typique produite par le VLP-16. Il s'agit d'une image prise dans un couloir du Géopolis (bâtiment de l'Université de Lausanne). Cette image est représentée sous forme 16 bandes et d'une grande densité de points pour sur l'axe x. La couleur représente l'intensité du signal retour (sans unité). Il est pour l'instant impossible de retrouver ce que représente réellement la scène, d'une part à cause de l'ouverture restreinte du capteur qui est de 30 degrés ainsi que la résolution limitée sur l'axe z.

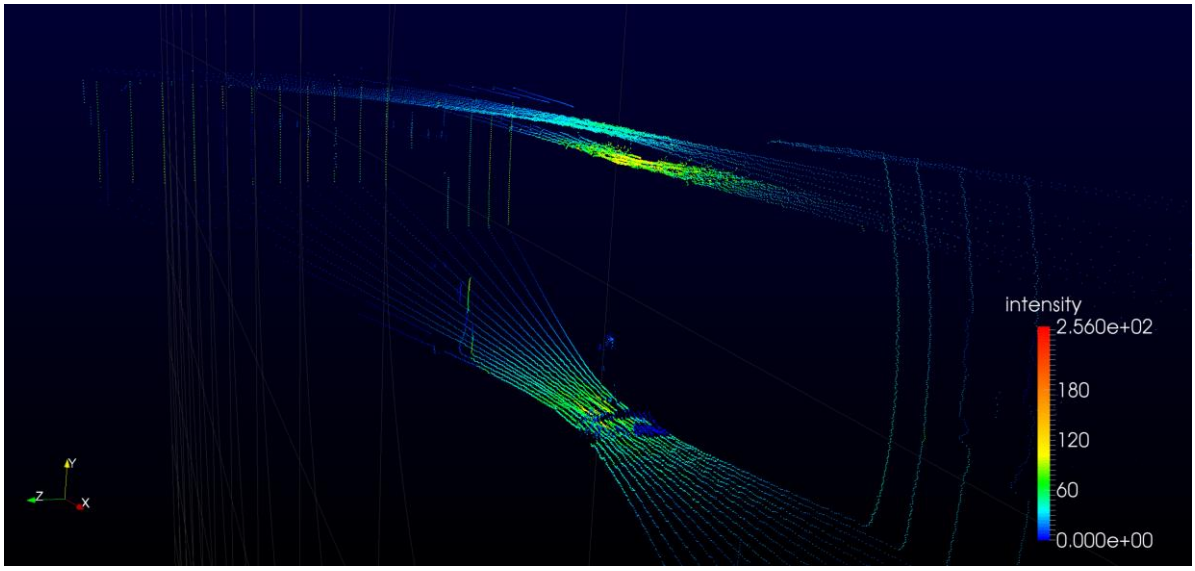


Figure 10 : Image typique produite par le VLP-16. Cette image a été acquise dans le Géopolis, la couleur des points représente l'intensité du signal retourné au lidar.

Étant donné les performances assez limitées du VLP-16, il a été nécessaire de déterminer une méthode permettant de densifier le nuage de points acquis avec le lidar, afin d'ensuite pouvoir faire fonctionner un algorithme d'alignement et d'assembler plusieurs scans. Pour cela, moyen choisis a été d'orienter le lidar dans plusieurs directions, afin de pouvoir augmenter la résolution sur l'axe z de la scène scannée.

Ceci engendre une difficulté qui est de pouvoir réaligner tous les points dans le même référentiel. Une station inertielle aurait pu être utilisée afin de connaitre de manière relativement précise le déplacement que fait le lidar entre deux mesures. Cependant, un suivi de la position de la plateforme uniquement à partir d'une IMU implique de nombreuses erreurs au fil du déplacement.

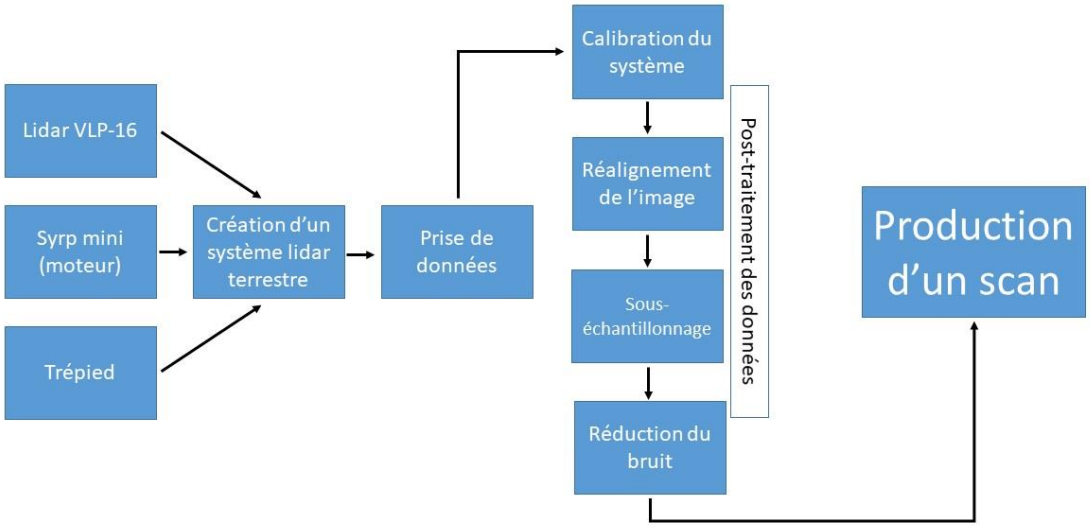


Figure 11 : Présentation des différentes étapes effectuées dans ce travail pour la production d'une image à partir du système lidar terrestre.

Finalement, il a été choisi de positionner le lidar de manière fixe et d'utiliser un petit moteur à placer sous le système permettant d'effectuer une rotation à 360 degrés autour du point central. Un système comme cela nécessite une calibration, afin de pouvoir obtenir des mesures précises. La figure 11 présente le workflow entrepris pour la création du système lidar terrestre. Les différents éléments composant le système sont le lidar, le moteur ainsi que le trépied. Les détails concernant le post-traitement des données sont discutés au chapitre 3.7.

Une fois le système lidar terrestre imaginé, il a été possible de le créer comme le montre la figure 12. Le système peut être adapté selon le type de terrain. À l'extérieur, une batterie externe peut être utilisée pour alimenter le lidar.

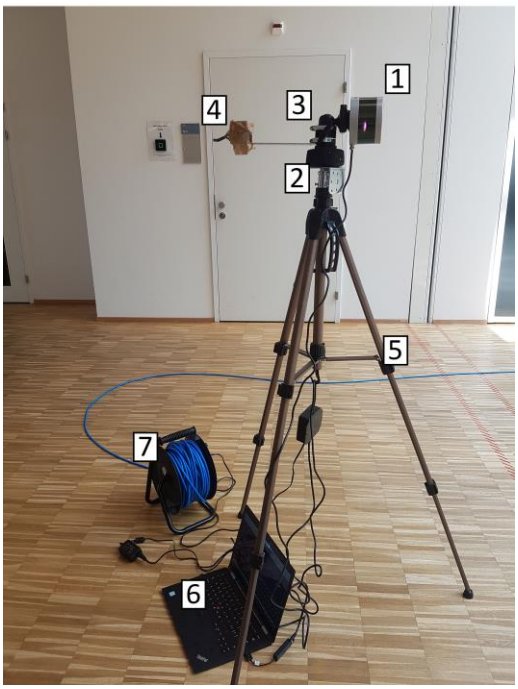


Figure 12 : Photo du système lidar terrestre : (1) Velodyne VLP-16, (2) moteur, (3) rotule, (4) contrepoids, (5) trépied, (6) ordinateur pour contrôler le lidar, (7) alimentation (peut être remplacé par une batterie)

3.1.1 Caractéristiques du VLP-16 de Velodyne

Le VLP-16 Puck de Velodyne est un scanner lidar low-cost (figure 13). Produit depuis 2017, son prix initial était de 8000$ (TU-editor, 2018), suite à l'augmentation de la demande principalement pour les automobiles autonomes, son prix a grandement baissé jusqu'à 4000$ en 2018. À ce jour, de nouveaux modèles de la même gamme plus performants sont en vente sur leur site internet.

Le VLP-16 Puck est composé de 16 bandes laser (Velodyne, 2018), il permet une acquisition à plus de 100 mètres de distance. Sa précision est de ± 3cm. Le système permet un enregistrement de deux retours selon son paramétrage, dans ce travail seul le premier retour sera utilisé. Son champ de vision est de 30° (+15° à -15°) verticalement et de 360° horizontalement. Sa résolution angulaire verticale est de 2° et sa résolution angulaire horizontale est de 0.2°. Sa fréquence de mesure est de 300'000 points à la seconde pour l'enregistrement d'un seul retour et de 600'000 points à la seconde pour l'enregistrement de deux retours. Ce modèle est doté de lasers d'une longueur d'onde de 903 nm. Il s'agit de lasers de classe 1 et ne comportent donc aucun danger pour l'œil humain. Les spécifications complètes peuvent être retrouvées en annexe 2.

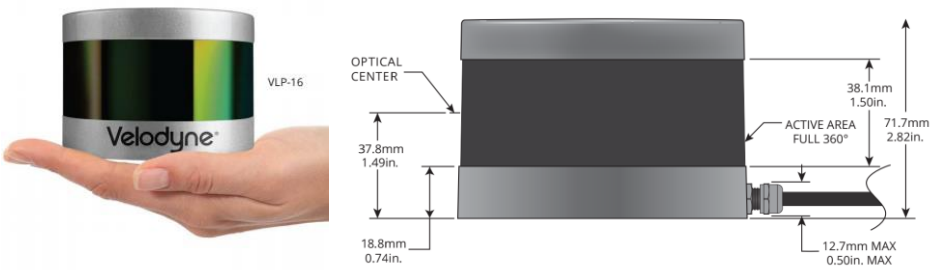


Figure 13 : Aspect et dimensions du lidar VLP-16 Puck de Velodyne (Velodyne, 2018)

3.1.2 Caractéristiques du moteur

Dans l'optique de rester dans un contexte low-cost, le choix du moteur électrique s'est porté sur un modèle relativement compact et bon marché. Afin de recouvrir la totalité de l'environnement, il était nécessaire de trouver un modèle permettant une rotation d'au moins 360 degré et résistant au poids du lidar.

Le moteur choisi est le *Syrp Genie Mini* (figure 14). Il s'agit d'une tête motorisée permettant d'effectuer une rotation régulière à vitesse paramétrable. Le moteur est commandé à distance par liaison Bluetooth 4.0 et est équipé d'un pas de vis permettant de fixer le lidar. Le temps de rotation pour 360 degrés peut varier entre 36 secondes et 24'600 secondes ce qui offre le choix quant à la résolution finale du nuage de points. Afin d'éviter toute contrainte due au poids du lidar pendant la rotation, le moteur a été positionné à plat, comme le montre la figure 12.

Figure 14 : Syrp Genie mini (Syrp, 2019)

3.1.3 Caractéristiques de la rotule

Le lidar a été positionné verticalement par rapport à l'axe de rotation du moteur, il a fallu modifier son orientation. Pour cela, la rotule QHD-63D de Velbon a été utilisée. Il s'agit d'un modèle résistant au poids du lidar et pouvant s'orienter manuellement à 90 degrés. Trois niveaux à bulle se trouvent sur la rotule permettant un bon positionnement du trépied. Une plaque de serrage fournie avec la rotule a permis la fixation rapide du lidar.

Figure 15 : Photo de la rotule permettant de fixer le lidar au moteur.

3.1.4 Caractéristiques du trépied

Le trépied utilisé est un modèle standard généralement utilisé pour la photographie. Une tête en acier comprenant une vis a été installée et a permis de positionner le moteur de manière relativement stable. Une plaque en métal séparant les deux pièces a permis de fixer les composants tout en évitant un maximum de jeu.

3.1.5 Caractéristiques du contrepoids

Étant donné que le centre de masse du lidar n'est pas positionné exactement au-dessus du centre de rotation du moteur, un contrepoids a été fixé sur une tige en métal à la base de la rotule. Ce contrepoids permet d'éviter les contraintes potentielles subies par le moteur pouvant fausser la vitesse de rotation. Pendant une acquisition de données, il est important de placer correctement le trépied à l'aide du niveau à bulle, afin que l'utilisation du contrepoids soit validée.

3.1.6 Caractéristiques de l'alimentation

Une batterie externe a été utilisée permettant l'alimentation du lidar lors d'acquisitions de données à l'extérieur. La GOAL ZERO Powerbank Yeti 400 Lithium a été utilisée. Il s'agit d'une batterie d'une capacité de 39600 mAh et d'une tension de 10.8 V. Cette batterie a le désavantage d'être relativement lourde (7.2kg), mais a une autonomie de plusieurs 12h.

Figure 16 : GOAL ZERO Powerbank Yeti 400 Lithium. Batterie permettant l'utilisation du lidar sans prise électrique à proximité

3.2 Comparaison avec un système d'alignement SLAM

Une fois le système lidar terrestre mis en place, des mesures vont pouvoir être comparées à un système scanneur mobile utilisant un alignement par SLAM. Le système en question est le ZUB-REVO de GeoSLAM qui permet la reconstruction rapide d'une scène sous forme de nuages de points 3D.

Son usage est relativement simple. L'utilisateur parcourt le terrain en tenant l'appareil dans la main et en visant l'environnement. Les données sont ensuite traitées dans le logiciel du fabricant et permettent l'alignement des points grâce à son algorithme SLAM ainsi qu'aux données enregistrées par la station inertielle comprise dans le système. Le scanneur enregistre les données à une fréquence de 100Hz permettant l'obtention d'environ 40'000 points à la seconde à une précision de ± 15mm selon les constructeurs. Ce genre de système a l'avantage de ne pas dépendre d'une connexion GPS pour procéder à un alignement, mais est limité par sa portée qui est de seulement 30 mètres.

Figure 17 : ZUB-REVO de geoSLAM

3.3 Choix des logiciels

3.3.1 Veloview

Le VLP-16 est livré avec le logiciel *Veloview* qui permet une visualisation en temps réel du scan. Cette interface permet de commander le lidar pour débuter et pour stopper la prise de mesure. Les scans sont enregistrés par défaut au format .pcap et peuvent être ensuite exportés dans divers formats (.CSV, .XYZ, .LAS). Une visualisation des points est possible selon la distance, l'intensité du retour, l'azimut ou encore l'ID du laser.

3.3.2 Matlab

Matlab est le logiciel de calcul utilisé pour ce travail. Matlab a l'avantage de pouvoir manipuler des matrices et tableaux facilement. Beaucoup de fonctions spécifiques au traitement des nuages de points sont disponibles dans la toolbox *Computer vision* de Matlab, et ont permis de faciliter l'élaboration des scripts, tout comme la riche documentation dont est pourvu le logiciel. De plus, une interface graphique peut être développée à partir du code afin de permettre une utilisation simplifiée d'un script conçu.

3.3.3 CloudCompare

CloudCompare est un logiciel d'édition et de traitement de nuages de points 3D. Ce logiciel est pourvu d'une licence GNU (General Public License). Il est principalement utilisé pour la visualisation des nuages de points reconstruits, ainsi que pour l'élaboration de rendus. De nombreux algorithmes y sont implémentés permettant par exemple le sous-échantillonnage d'un nuage de points, la réduction du bruit (denoising), l'élaboration de mesh ou encore l'alignement automatique (algorithme ICP) ou manuel de nuages de points (Picking point pairs). L'avantage de ce logiciel est sa capacité à afficher des nuages de points de très grande taille (plusieurs dizaines de millions de points), son efficacité de traitement des nuages de points ainsi que sa gratuité.

3.4 Installation du système sur le terrain

La mise en place du système sur le terrain pour une acquisition dépend du type de produit de sortie souhaité. Les différents paramètres attribuables lors de la prise de données (vitesse de rotation du moteur, angle de rotation) impliquent une différence dans la résolution du nuage de points. La figure 18 montre la résolution horizontale de l'image finale est directement proportionnelle à la vitesse de rotation du moteur et à la distance au lidar. La résolution verticale est quant à elle fixée par le lidar et est de 0.2 degré (Velodyne, 2018).

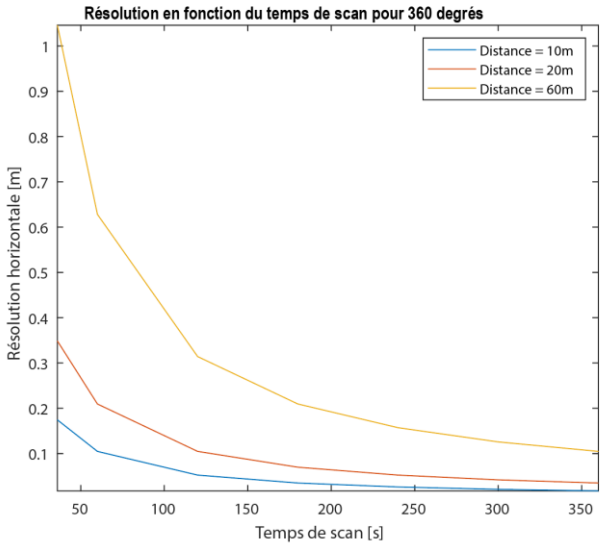


Figure 18 : Résolution horizontale théorique en fonction de la durée d'acquisition pour trois distances de scans.

Le choix de ces paramètres est motivé par le temps à disposition pour l'acquisition, la distance aux objets visés ainsi qu'à la géométrie de la scène. Par exemple pour un scan à l'intérieur d'un bâtiment, il sera nécessaire d'effectuer plusieurs assemblages, car de nombreuses zones d'ombre (escaliers, couloirs, mobilier) sont présentes lors des mesures. Un temps de scan rapide peut être effectué, car la résolution de l'image sera déjà haute de par la proximité des objets par rapport au lidar. Par contre, pour un scan d'une paroi rocheuse par exemple, l'angle de prise de données n'a pas forcément besoin d'être de 360 degrés. Le lidar aura besoin de moins de temps de scan. Cependant, la résolution de l'image de sortie sera plus faible de par la distance de scan important. Le tableau 1 montre trois exemples de paramétrage du système en fonction de la scène scannée. La résolution verticale du scanner correspond à 0.2 degré, la résolution horizontale est fixée sur celle-ci. Il faut prendre en compte qu'il s'agit de la résolution maximale, en pratique, il se peut que certains points ne soient pas mesurés par manque d'intensité du signal retour par exemple.

Tableau 1 : Paramétrage du système pour trois exemples de mesures

Terrain d'étude	Distance de scan	Résolution verticale [m]	Résolution horizontale [m]	Temps de scan [s]	Angle de rotation [degré]
Intérieur bâtiment	10	0.017	0.026	240	360
Grotte	20	0.035	0.035	360	360
Paroi rocheuse	60	0.10	0.10	120	120

Il est préférable de prendre des mesures en favorisant un long temps de scan, nous verrons dans les résultats que la précision de scan est meilleure lorsque le moteur tourne plus lentement. Les résolutions verticale et horizontale peuvent être adaptées en post-traitement. Il faut aussi prendre en compte que le temps de traitement des données est plus long en fonction du temps de scan.

Dans le cas d'assemblage de nuages de points, il est important de conserver une zone commune entre chaque scan pour effectuer un alignement. Comme vu précédemment, l'alignement se fait en partie manuellement, suivi de l'application de l'algorithme ICP. C'est pourquoi lorsque plusieurs scans ont été pris, le lidar a été positionné dans la même direction afin de facilité la reconstruction de nuage de point ainsi que le traitement à effectuer.

Il est préférable de positionner le lidar de façon à ce que les faisceaux laser frappent les objets le plus perpendiculairement possible. Cela permet d'éviter la réflexion et d'obtenir une bonne intensité, donc un maximum de points captés (Daniel et Larouche, 2018). Afin de diminuer la surface de l'empreinte du laser et ainsi obtenir une meilleure précision des données, la rasance du signal sur un objet a été évitée.

Une fois que tout a été mis en place, le lidar a été enclenché depuis l'interface de Veloview. Ensuite, en ayant pris soin de ne pas apparaitre dans le champ de scan du lidar, le moteur a été enclenché depuis l'application sur smartphone. Une fois le moteur arrêté, le lidar peut être stoppé. Le trépied peut ensuite être déplacé afin d'effectuer d'autres scans.

Figure 19 : Mise en place du système lidar terrestre sur le terrain.

3.5 Post-traitement des données

À la suite d'une acquisition de données avec le lidar, Velodyne nous propose de visualiser le nuage de points, image par image, sur leur interface (Veloview). Il est pour l'instant impossible d'utiliser les images produites par le lidar, car il est nécessaire d'effectuer un ajustement de chaque image pour les mettre dans le bon référentiel. Une fois que le fichier à traiter a été exporté dans Veloview, un code Matlab est chargé de faire les ajustements nécessaires.

Ce chapitre va traiter des différentes manipulations effectuées par le code lors du traitement des données prises sur le terrain.

3.5.1 Initialisation des paramètres

La première partie du code permet d'initialiser les différents paramètres utiles au traitement des nuages de points. Ces paramètres comprennent la vitesse du moteur, la durée du scan, et l'angle de rotation.

Comme le système comprend des éléments indépendants (moteur et lidar) il est nécessaire de les synchroniser ensemble. Pour cela, il faut déterminer précisément à quel moment le moteur commence sa rotation. Cette information peut être déterminée manuellement depuis Veloview en naviguant entre les images afin d'observer à quel moment le moteur est enclenché. Cette étape peut être relativement fastidieuse, c'est pourquoi un script a été créé afin d'automatiser ce processus.

3.5.2 Transformation et réalignement des images

Dans la suite du code, chaque image acquise pendant le scan (10 images par seconde) est extraite du fichier. La première image va servir de système de coordonnées de référence, celle-ci est centrée au centre optique du lidar. Ensuite, les autres images seront réalignées pour se placer dans le même référentiel que la première. La figure 20 illustre le processus de transformation qui est exécuté par le code, un nuage de point représentant une théière est pris comme exemple.

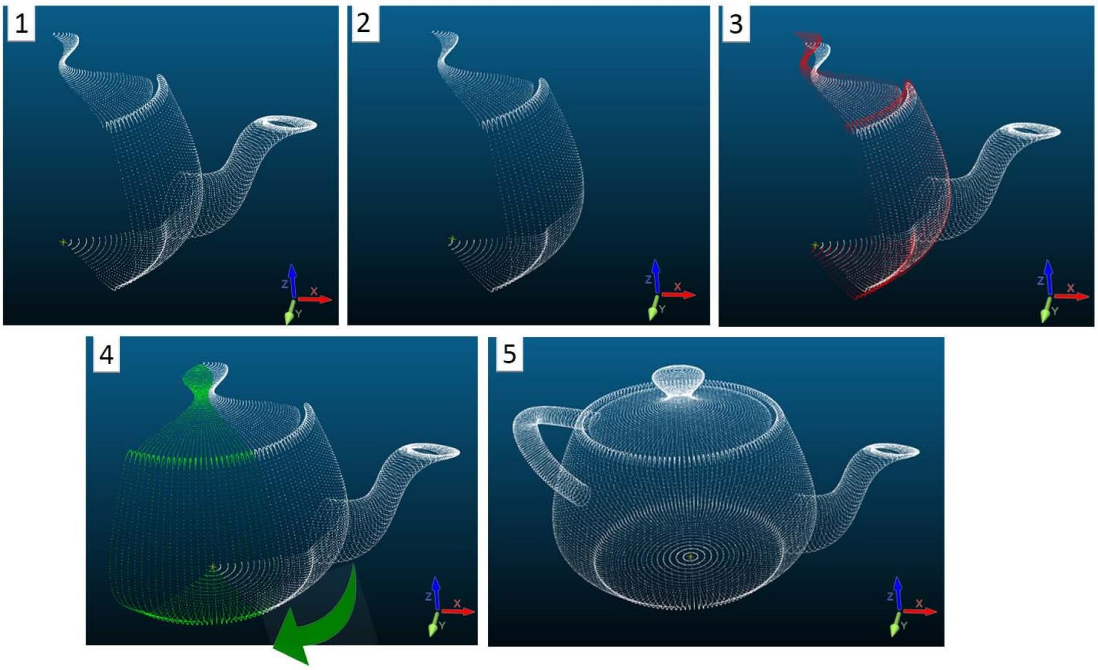


Figure 20 : Processus de transformation exécuté par le code pour la formation d'une image avec comme exemple une théière.

1) Représentation du scan au moment $t = t_0$. Seule une partie de la théière est donc scannée sur cette image, elle correspond à l'ouverture du lidar qui est de 30 degrés. Cette image est utilisée comme système de référence.

2) Représentation du scan à $t = t_1$, une seconde partie de la théière est scannée.

3) Représentation de la scène lorsque les deux images sont visualisées simultanément. Il est nécessaire d'appliquer une transformation afin d'aligner les deux images correctement. Cette transformation équivaut à une rotation sur l'axe z dans le sens horaire et d'un angle correspondant à l'angle de rotation du moteur entre t_0 et t_1.

4) Représentation des images après transformation. L'image au temps $t = t_1$ est maintenant représentée dans le référentiel de la première image. Ainsi, au fur et à mesure que le code analyse les images, les scans peuvent être correctement référencés et peuvent représenter l'ensemble de la scène.

5) Visualisation du résultat après la transformation des images entre le temps t_0 et t_f.

Pour réaliser ces étapes dans le code, la toolbox *Computer vision* de Matlab a été utilisée. Elle permet de manipuler les nuages de points et de leur appliquer une transformation rigide. À chaque itération du code, une image est sélectionnée. Une transformation géométrique affine 3D, en l'occurrence une rotation reliée au numéro de l'image et donc au temps, est appliquée. Cette transformation affine 3D se caractérise sous forme de matrices 4x4 (Mathworks, 2019).

$$T = \begin{bmatrix} a & b & c & 0 \\ d & e & f & 0 \\ g & h & i & 0 \\ j & k & l & 1 \end{bmatrix}$$

Avec abc, la rotation à effectuer sur x, def, la rotation à effectuer sur y, ghi, la rotation à effectuer sur z. Les paramètres jkl représentent la translation à effectuer sur x y et z.

La matrice de transformation permettant l'ajustement de chaque image dans le code est représentée sous cette forme :

$$T_1 = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & 0 & \sin(\alpha) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Avec α représentant l'angle de rotation du moteur entre la première image et l'image à traiter.

Une fois que toutes les images ont été traitées, l'ensemble des images est réassemblé en un seul nuage de points.

3.5.3 Sous-échantillonnage

Comme l'ensemble des images est enregistré en un seul nuage de points, nous nous trouvons avec un très gros fichier atteignant souvent plusieurs dizaines de millions de points. Tous ces points ne sont pas indispensables. En effet, les zones proches du lidar ont une très forte densité de points, contrairement aux zones plus éloignées. La figure 21 montre la résolution horizontale du nuage de point en fonction de la distance au lidar pour trois différentes durées de scan et pour une distance entre 0 et 5 mètres. Cette résolution est très importante (0.1mm pour les points les plus proches enregistrés).

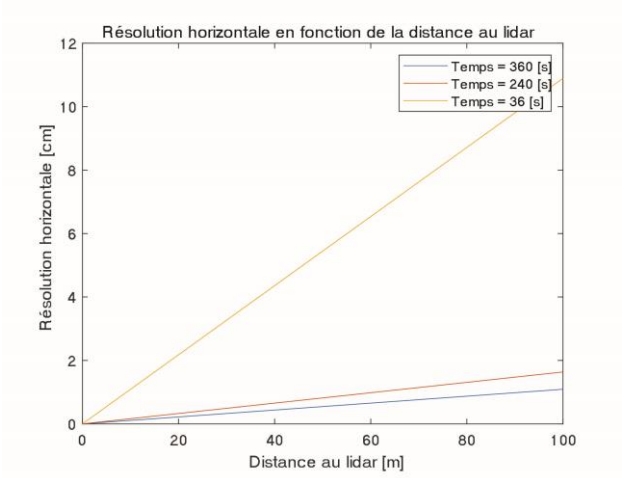


Figure 21 : Résolution horizontale obtenue en fonction de la distance de scan selon trois durées de scan (à 360 degrés)

Ainsi, il est possible de sous-échantillonner le nuage de points pour retirer les points superflus. Le sous-échantillonnage peut se faire en sélectionnant un pourcentage de points à conserver ou en initialisant une distance minimale entre les points. Cette deuxième méthode a été utilisée, car elle permet de conserver la totalité des points les plus éloignés du lidar. Le sous-échantillonnage accélère grandement la manipulation et la visualisation du nuage de points et est une étape indispensable dans le post-traitement des données lidars (Mathworks, 2019).

3.5.4 Réduction du bruit

Ensuite, un filtre permettant la réduction du bruit dans le nuage de points peut être appliqué. Généralement, le filtrage du bruit doit s'effectuer avant le sous-échantillonnage (Han *et al.*, 2017; Orts-Escolano *et al.*, 2013). Cependant, la densité de points énorme à proximité du lidar implique un temps de traitement démesuré selon les paramètres de filtrage. C'est pourquoi un sous-échantillonnage a été effectué avant la réduction du bruit afin d'accélérer le processus qui est tout de même relativement long (environ 2h de traitement pour un nuage de points de 100 millions de points). Ce filtre est relié à deux paramètres qui sont (i) le nombre de voisins et (ii) le seuil (Mathworks, 2019).

(i) Le nombre de voisins : il s'agit du nombre de points les plus proches permettant de former une paire avec le point central. Cette valeur est utilisée pour estimer la moyenne de la distance aux points voisins. Diminuer cette valeur rend le filtre plus sensible au bruit, augmenter cette valeur rend les calculs plus longs et moins sensibles (CloudCompare, 2019).

(ii) Le seuil : il correspond à un écart-type par rapport à la moyenne de la distance moyenne aux points voisins. Un point est considéré comme aberrant si la distance moyenne par rapport à ses k-voisins les plus proches est supérieure au seuil spécifié (CloudCompare, 2019).

La figure 22 montre un exemple de paramétrage utilisé pour la réduction du bruit dans un nuage de points dans CloudCompare. Divers paramétrages ont été testés afin de produire un nuage de points le plus « propre » possible.

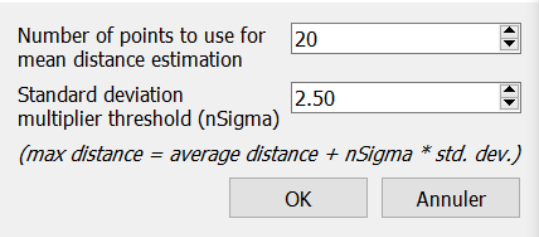


Figure 22 : Exemple de paramétrage pour la réduction du bruit dans un nuage de points.

3.5.5 Calibration du système lidar terrestre

Un point primordial à prendre en considération est la calibration du système. Comme le système est composé d'éléments indépendants, il est nécessaire de les calibrer entre eux. Jusqu'à maintenant nous avons supposé que le lidar tournait sur un point fixe, équivalent à son centre optique. En réalité, étant donné que lidar est positionné sur un bras (la rotule), cela implique la nécessité d'ajouter ce paramètre lors de l'ajustement des différentes images.

Figure 23 : Illustration de la longueur du bras de 0.095m ainsi que le sens de rotation du système

Cette distance a été mesurée manuellement, elle correspond à 9.5 cm (figure 23). Elle représente un déplacement de +0.095 m en direction de l'axe z selon le repère orthonormé du lidar. Pour chaque image, il a donc été nécessaire d'effectuer une translation sur l'axe z en plus de la rotation effectuée par le moteur. Cette transformation affine a été effectuée à l'aide de la matrice suivante :

$$T_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.095 & 1 \end{bmatrix}$$

Un autre élément à souligner et le fait que le code réaligne les images en supposant que le repère orthonormé du lidar est similaire au repère orthonormé du moteur (figure 24). En réalité, ces systèmes ne sont pas complètement similaires. Il existe donc deux angles α1 et α2 qui représentent le décalage entre les deux systèmes de coordonnées. Les figures 25a et 25b montrent les décalages possibles entre les verticales y' et y respectivement l'axe de rotation du moteur et l'axe vertical du lidar.

Figure 24 : le système de coordonnées du lidar xyz est positionné sur le centre optique du système. Un autre système de coordonnées, centré sur l'axe de rotation du moteur peut être représenté et indique l'emplacement théorique sur lequel les transformations nécessaires à l'alignement des images sont effectuées.

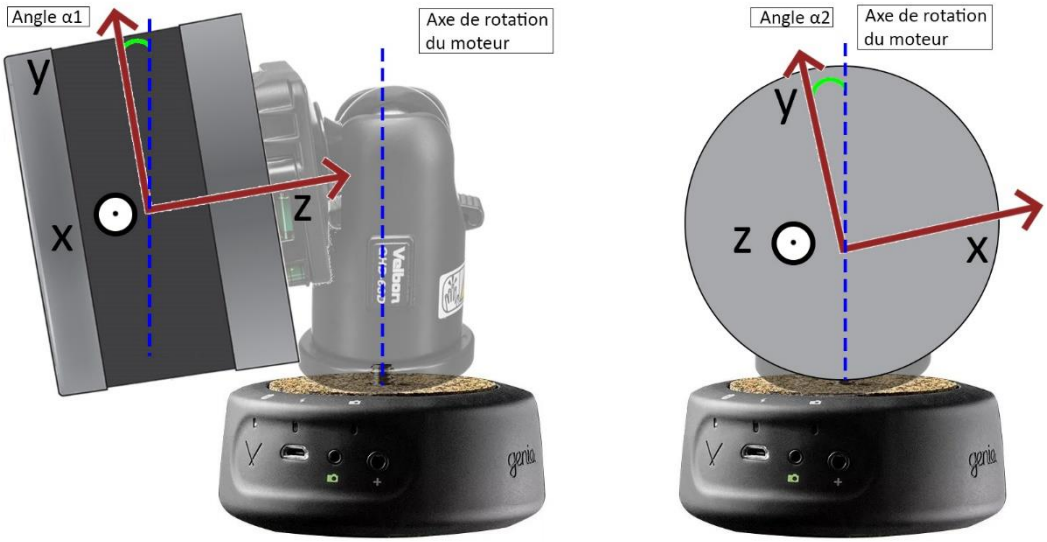


Figure 25a et 25b : La figure de gauche représente une vue de profil du système et montre l'angle α1 correspondant au décalage entre l'axe de rotation du moteur et l'axe vertical du lidar causé par une rotation sur l'axe x. la figure de droite représente une vue de face du système et montre l'angle α2 séparant les droites verticales causées par une rotation sur l'axe z.

Pendant l'installation du lidar, la bulle présente dans la rotule nous donne une indication quant au positionnement du lidar, tout comme la bulle présente sur le trépied. Il est ainsi possible de positionner les deux pièces de manière à obtenir un système de coordonnées similaire. Cependant, l'ajustement manuel de ces systèmes de coordonnées implique de petites erreurs qui peuvent influencer énormément la mesure des points les plus éloignés. Comme ces micro-décalages ne peuvent pas être mesurés manuellement, le code a tout d'abord été lancé en négligeant ces paramètres α1 et α2, en les fixant donc à 0.

Une calibration automatique du système doit être appliquée avant chaque reconstruction de la scène afin de trouver les paramètres α1 et α2 appropriés pour obtenir une image la plus proche de la réalité. Cette calibration automatique utilise la commande Matlab *fminsearch* permettant de retrouver les paramètres d'une fonction (Matworks, 2019). Cette fonction utilise l'algorithme d'optimisation de Nelder-Mead qui consiste à minimiser une fonction continue à l'aide de simplexe de dimension équivalente au nombre de paramètres à rechercher (Lagarias *et al.*, 1998). À chaque itération, un point situé à proximité du simplexe initial est généré impliquant un nouveau simplexe si un minimum est trouvé, et ce jusqu'à la réduction minimale de la fonction (selon un seuil préalablement déterminé).

Les paramètres α1 et α2 ont une influence sur la géométrie après reconstruction de la scène scannée. Comme nous le verrons dans les résultats, un mauvais paramétrage de α1 implique la création d'un flou autour des objets scannés. Un mauvais paramétrage de α2 implique la création d'un effet de « doming » qui s'accentue pour les points les plus éloignés. Le flou généré par le mauvais paramétrage de α1 est provoqué par le mauvais alignement de chacune des bandes de scans. Ce paramètre peut donc être retrouvé en minimisant la distance en chaque bande de scans. Pour cela, le code extrait les deux bandes de scans les plus éloignées, en l'occurrence les bandes 1 et 16. Ensuite, la distance est mesurée entre les deux nuages de points.

Dans le cas où le moteur est paramétré pour un scan de 360 degrés, la même scène est en réalité scannée à deux reprises étant donné que le lidar permet une acquisition également à 360 degrés. Le « doming » généré par le mauvais paramétrage de α2 est provoqué par la mauvaise superposition entre ces deux scans. En minimisant la distance entre ces deux scans, il est possible de retrouver le second paramètre. Ces deux mêmes scènes doivent en théorie se superposer si le système est correctement calibré. Cette distance a donc été minimisée afin d'obtenir le paramètre α2.

Ainsi, la définition du paramètres α1 se fait en minimisant la fonction reliée à la distance entre les 16 bandes de scan. La définition du paramètre α2 se fait en minimisant la fonction reliée à la distance entre les valeurs positives et négatives sur x d'un scan. Pour la calibration, il est donc indispensable d'effectuer un scan en faisant tourner le moteur à 360 degrés afin de pouvoir obtenir un double nuage de points (valeurs en x positives et négative) et ainsi procéder à l'optimisation du paramètre α2.

3.5.6 : Évaluation des effets de la calibration et de la performance du système

Afin de visualiser les effets de la calibration sur les données, un couloir dans le bâtiment Géopolis d'une longueur d'environ 23 x 1.5m a été extrait d'une scène, ce pour chaque étape de la calibration. Ensuite, un plan théorique représentant la surface du couloir a été créé en utilisant les données mesurées. Ce plan est basé sur un intervalle de distance au lidar équivalent à la meilleure plage de précision, c'est-à-dire entre 3 et 7 mètres selon les tests performances du VLP-16 Puck (Glennie *et al.,* 2016). Cela permet d'éviter l'influence de points trop proches ou trop éloignés

pouvant ainsi fausser l'équation théorique du plan. De plus, les points sélectionnés pour la création du plan proviennent d'un sous-échantillonnage adéquat du scan initial afin d'uniformiser la densité de points sur l'intervalle de distance.

Ensuite, la distance de tous les points à ce plan théorique est évaluée et nous donne une indication sur la répartition des erreurs. L'évaluation de l'erreur en fonction de la distance de scan a également été mesurée.

Comme le moteur est facilement paramétrable, une évaluation des erreurs en fonction de la vitesse a été effectuée. Une même scène, en l'occurrence le couloir central du Géopolis, a été scannée pour une vitesse de scan de 10 degrés par seconde (vitesse maximale), 6 degrés par seconde, 3 degrés par seconde et 1 degré par seconde. Soit des durées de scan de 36 secondes, 1 minute, 2 minutes et 6 minutes. Chaque scan a été effectué à deux reprise et sans déplacer le trépied. Une fois le trépied calibré, les scans de durée similaires seront comparés. Ainsi, il sera possible de mesurer la distance entre les scans, qui devrait théoriquement être égale à 0. Cela nous permet de définir si la vitesse de rotation a un impact sur la précision des mesures.

3.6 Assemblage de nuage de points

Une fois que le système a été calibré et qu'un nuage de points dense a pu être généré, plusieurs scans peuvent être effectués. Ces scans ont ensuite été assemblés dans le but de ne former qu'un seul nuage de points. Ces assemblages sont effectués dans CloudCompare. La figure 26 présente le workflow réalisé permettant l'assemblages.

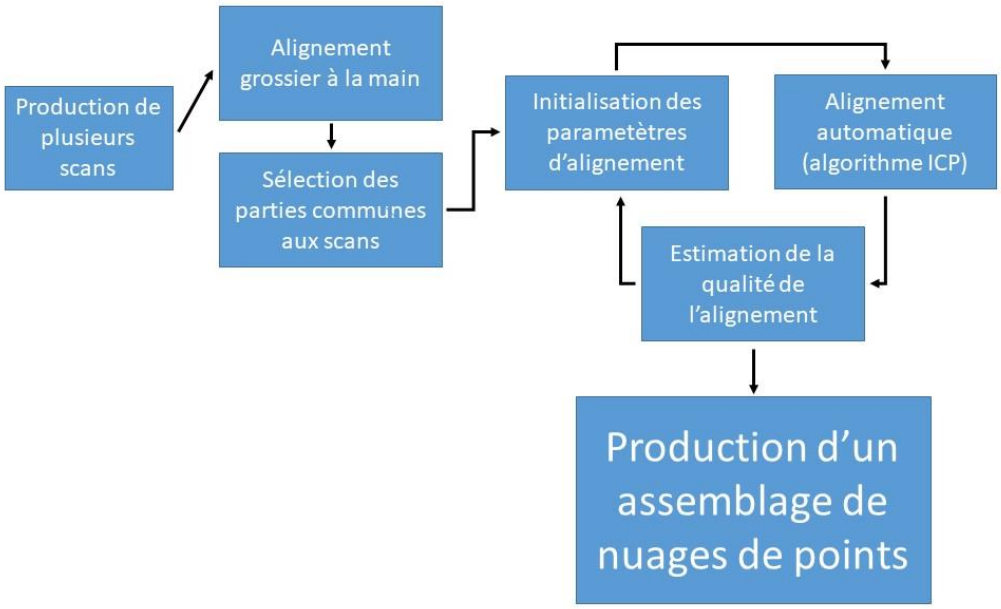


Figure 26 : Présentation des étapes nécessaires pour l'alignement des plusieurs nuages de points

Pour effectuer l'alignement, les scans ont été tout d'abord grossièrement alignés à la main. Ensuite les parties communes entre les différents scans ont été extraites à l'aide d'outil de découpe présent dans CloudCompare. Une fois les parties extraites, l'algorithme ICP peut être lancé depuis l'interface de CloudCompare.

L'algorithme ICP proposé par CloudCompare donne des paramètres permettant d'optimiser le temps de calcul et d'améliorer l'alignement entre les deux nuages de points (CloudCompare, 2019). Comme le montre la figure 27, il est possible de déterminer un seuil correspondant à la différence de distance entre deux itérations de l'algorithme. Ce seuil est déterminé par la valeur RMS qui représente la racine carrée de la moyenne arithmétique des carrés des distances. En dessous de ce seuil, l'algorithme est stoppé. Le nombre d'itérations à effectuer peut aussi être sélectionné manuellement.

Une case permet d'indiquer la proportion de points communes aux deux nuages de points. Cela permet d'aligner deux nuages de points n'ayant que certaines parties communes. L'algorithme permet aussi l'ajustement de l'échelle pour la transformation à effectuer. Dans le cas de cette étude, les scans lidars effectués n'ont pas besoin d'être ajustés, car leurs échelles sont semblables. Comme le montre la figure 27, il est aussi possible de modifier le nombre de points à utiliser dans chacun des scans. Augmenter ce nombre ralentit fortement le processus mais permet un alignement plus précis (CloudCompare, 2019). Afin de faire fonctionner l'algorithme plus efficacement, il est possible de bloquer la rotation sur les différents axes pendant l'alignement réduisant ainsi le nombre de possibilités de transformation. Dans la présente étude, ces fonctionnalités n'ont pas été utilisées bien que l'alignement horizontal soit relativement bien respecté (niveau à bulle utilisé sur le terrain).

Une fois le processus terminé, le résultat nous indique la transformation appliquée au scan comparé ainsi que la valeur RMS finale de l'alignement. À ce moment, la qualité de l'alignement est évaluée visuellement. Dans le cas où l'alignement n'est pas optimal, l'algorithme est à nouveau lancé. Une modification des paramètres comme la superposition finale ou la limite d'échantillons peut être adaptée afin d'améliorer le résultat (CloudCompare, 2019). Une fois les deux scans alignés, la matrice de transformation est enregistrée et appliquée à l'ensemble du nuage de points comparés.

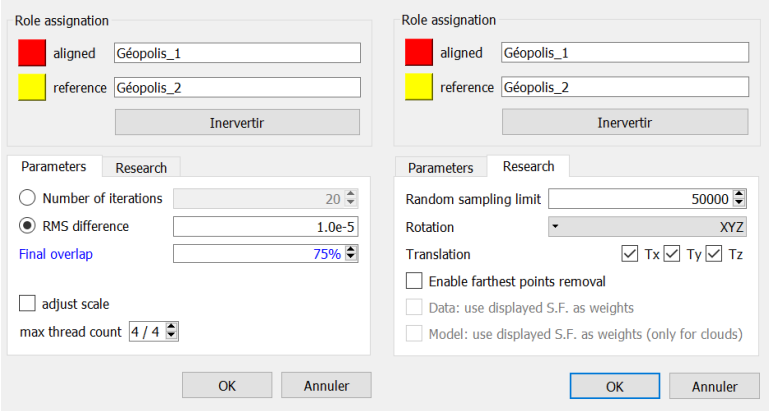


Figure 27 : Interface de l'algorithme ICP présente dans CloudCompare. Les paramètres indiqués sont similaires à ceux utilisés dans ce travail. La case « Final overlap » a été adaptée selon les scans.

3.7 Test du système dans différents environnements

Une fois le système mis en place, des assemblages de nuages de points seront effectués dans divers environnements. Pour l'ensemble des scans effectués, le lidar a été paramétré pour effectuer 360 degrés en 6 minutes. Ces paramètres ont permis une acquisition de points à haut résolution afin de maximiser l'information récolté tout en conservant une durée de scan raisonnable.

3.7.1 Bâtiment Géopolis

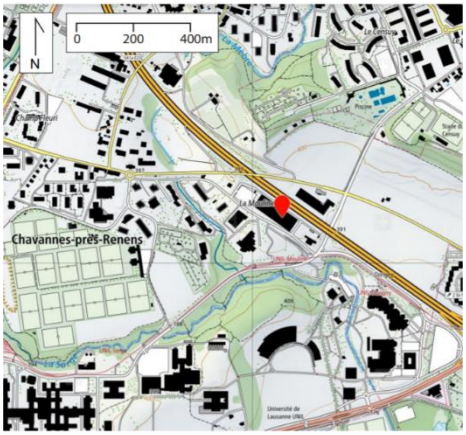


Figure 28 : Situation du Géopolis au sein du campus universitaire de Lausanne. (Carte d'après Swisstopo)

Tout d'abord, le système a été testé au sein du Géopolis, bâtiment de l'Université de Lausanne. Ce bâtiment inauguré en 2013 de 150 mètres de long est composé de quatre atriums distribuant la lumière.

Les premiers scans ont été effectués dans le couloir principal du 4ème étage. Ce bâtiment a la particularité d'être composé de nombreuse baies vitrées à l'intérieur et à l'extérieur ce qui a eu une influence sur les acquisitions au lidar. La longueur d'onde de 903nm du VLP-16 implique une réflexion sur les surfaces vitrées et a eu pour conséquence une recréation de l'image par symétrie. Les scans effectués dans ce bâtiment ont permis l'élaboration et l'amélioration du système lidar. Pour tester l'assemblage de plusieurs nuages de points, 4 scans ont été effectués.

3.7.2 Mines de Baulmes

Une fois le système lidar conçu, il a été utilisé dans le cadre de scans en extérieur dans l'optique de réaliser un assemblage de nuages de points. Le système a ainsi été utilisé dans un milieu confiné où aucune liaison GPS n'est possible rendant l'utilisation d'un tel système pertinent. Le choix s'est porté sur les mines de Baulmes, ancienne exploitation de chaux à ciment jusqu'à la fin de la Deuxième Guerre mondiale. Ces mines sont composées de deux parties, supérieure et inférieure, regroupant plus de 10km de galerie. En tout, 6 scans ont été effectués permettant de réaliser un assemblage des nuages de points. L'acquisition s'est faite pendant un jour pluvieux ce qui a eu pour conséquence la présence d'eau sur les parois de la mine.

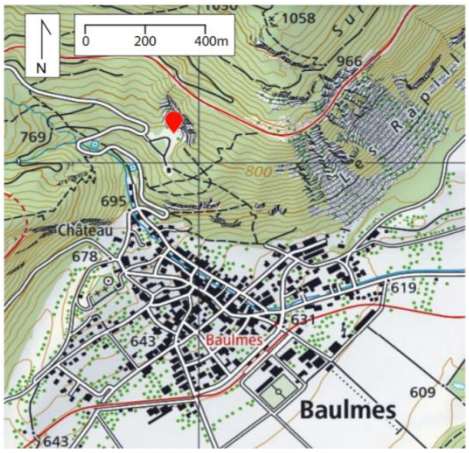


Figure 29 : Situation des mines de Baulmes

La principale difficulté a été l'installation du système lidar sur le terrain qui est très accidenté ainsi que la définition des emplacements de scan permettant d'obtenir une zone commune suffisante entre les scans, afin de pouvoir procéder à l'alignement.

3.7.3 Milieu forestier

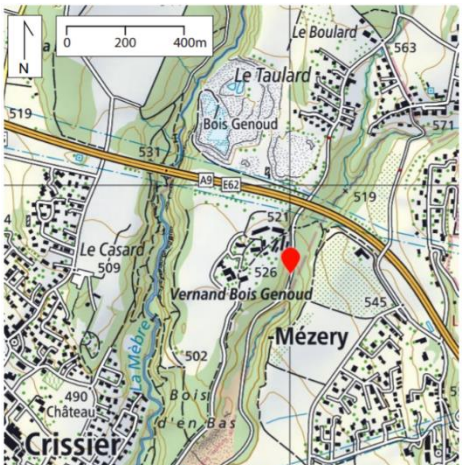


Figure 30 : Situation de Vernand Bois Genoud

Finalement, le système lidar a été testé dans un milieu forestier plus précisément à Vernand Bois Genoud à proximité de Crissier (figure 30). Deux scans ont été effectués et ont permis un assemblage des nuages de points. La principale difficulté rencontrée est la forte zone d'ombre produite dans chacun des scans due à la végétation. Les scans ont donc été effectués relativement proche l'un de l'autre afin de maximiser les chances d'obtenir une zone commune entre les deux nuages de points. De plus, le vent présent au moment de l'acquisition de données n'a pas facilité la prise de mesures.

3.8 Comparaison avec le Géoslam

Le système lidar terrestre a été comparé avec une acquisition réalisée avec le ZUB-REVO de Geoslam. Pour cela, un scan du couloir principal au 4e étage du Géopolis a été effectué au même emplacement que les scans faits pour l'assemblage. Les deux scans ont ensuite été alignés dans CloudCompare à l'aide de l'algorithme ICP. Une fois le meilleur résultat obtenu, un outil permettant d'évaluer la distance entre les deux nuages de points a été utilisé.

3.8.1 Évaluation de la distance

Pour estimer la distance entre deux nuages de points il faut choisir lequel représentera la référence. Les distances ont été calculées relativement à ce dernier. En général, le nuage de points le plus dense est utilisé comme référence et correspond dans notre cas au nuage créé par le VLP-16 (CloudCompare, 2019).

Comme les deux nuages de points n'ont pas la même résolution, il est difficile de créer des paires de points entre les deux nuages permettant de mesurer la distance. D'autant qu'il n'est pas certain que les deux points sélectionnés soient réellement similaires. C'est pourquoi un modèle local est généralement utilisé. Ce modèle consiste à définir localement la surface représentée par un nuage et la comparer à la surface de l'autre nuage de points.

Il existe plusieurs modèles pour la mesure de distance, mais un modèle quadratique est généralement préconisé (Bater et Coops, 2009; Reitberger *et al.,* 2009). Pour cela, un sous-ensemble du nuage de points est extrait, celui-ci correspond à tous les points englobés dans une sphère d'un rayon prédéfini. Pour chaque ensemble de points, une fonction quadratique est définie et est ensuite comparée aux fonctions quadratiques produites à partir du second nuage de points. Des paires de points sont sélectionnées permettant ainsi le calcul de distance entre les nuages de points.

4. Résultats

Tous les nuages de points sont visualisés dans le logiciel CloudCompare. Un filtre d'ombrage EDL (Eye Dome lighting) permettant la création d'ombrage en temps réel a été appliqué pour une meilleure visualisation (CloudCompare, 2019). Des QR codes menant vers des liens vidéo sont présents dans l'annexe 3 et présentent les assemblages sous forme d'animations vidéo.

Tous les résultats de l'optimisation des paramètres α1 et α2 peuvent être retrouvés dans l'annexe 4.

4.1 Calibration du lidar

Les premiers résultats présentés concernent un scan effectué dans une zone de travail au 4e étage du Géopolis. La scène est caractérisée par un agencement de bancs et de tables ainsi que par la présence d'une baie vitrée sur la gauche ayant comme conséquence la recréation de la scène en symétrie de par son importante réflectance à la lumière infrarouge. La figure 31 présente cette scène à la suite des différentes transformations effectuées par le script.

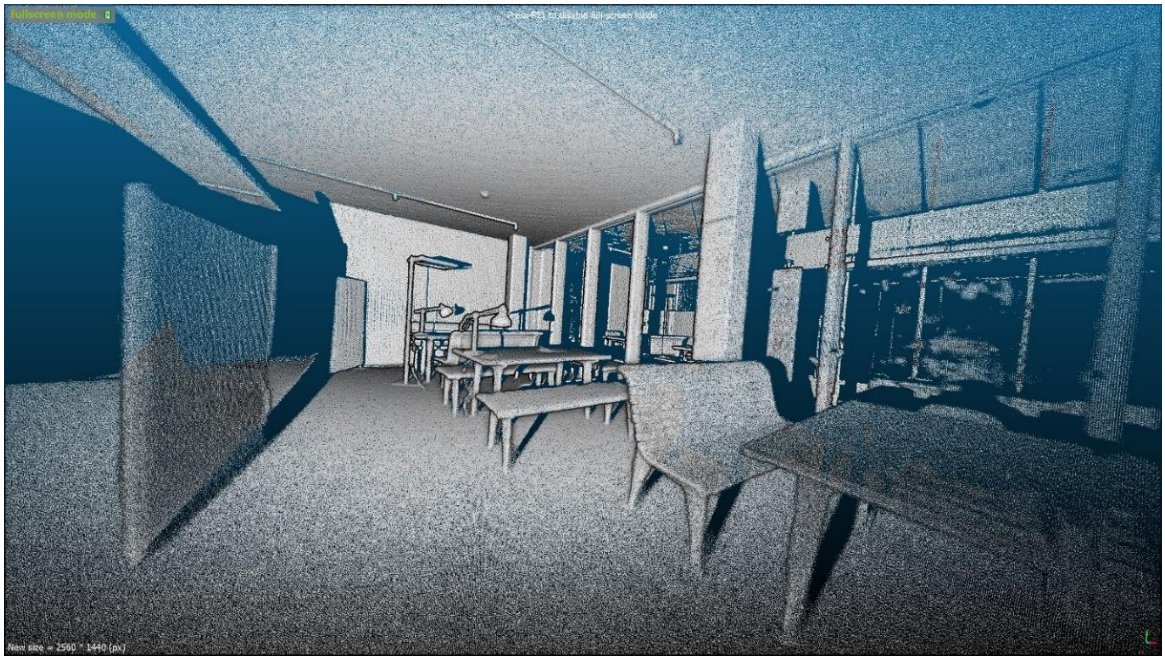


Figure 31 : Résultat de la densification d'un nuage de points avec le système lidar. Exemple d'une zone de travail au 4ème étage du Géopolis

4.1.1 : Visualisation des effets de la calibration

La figure 32 résume les différentes étapes effectuées, afin de pouvoir obtenir le résultat de la figure 31. Un zoom a été fait sur une table et deux bancs situés à environ 2.8m du lidar et permet du visualiser l'amélioration de la qualité du nuage de points au fil des étapes.

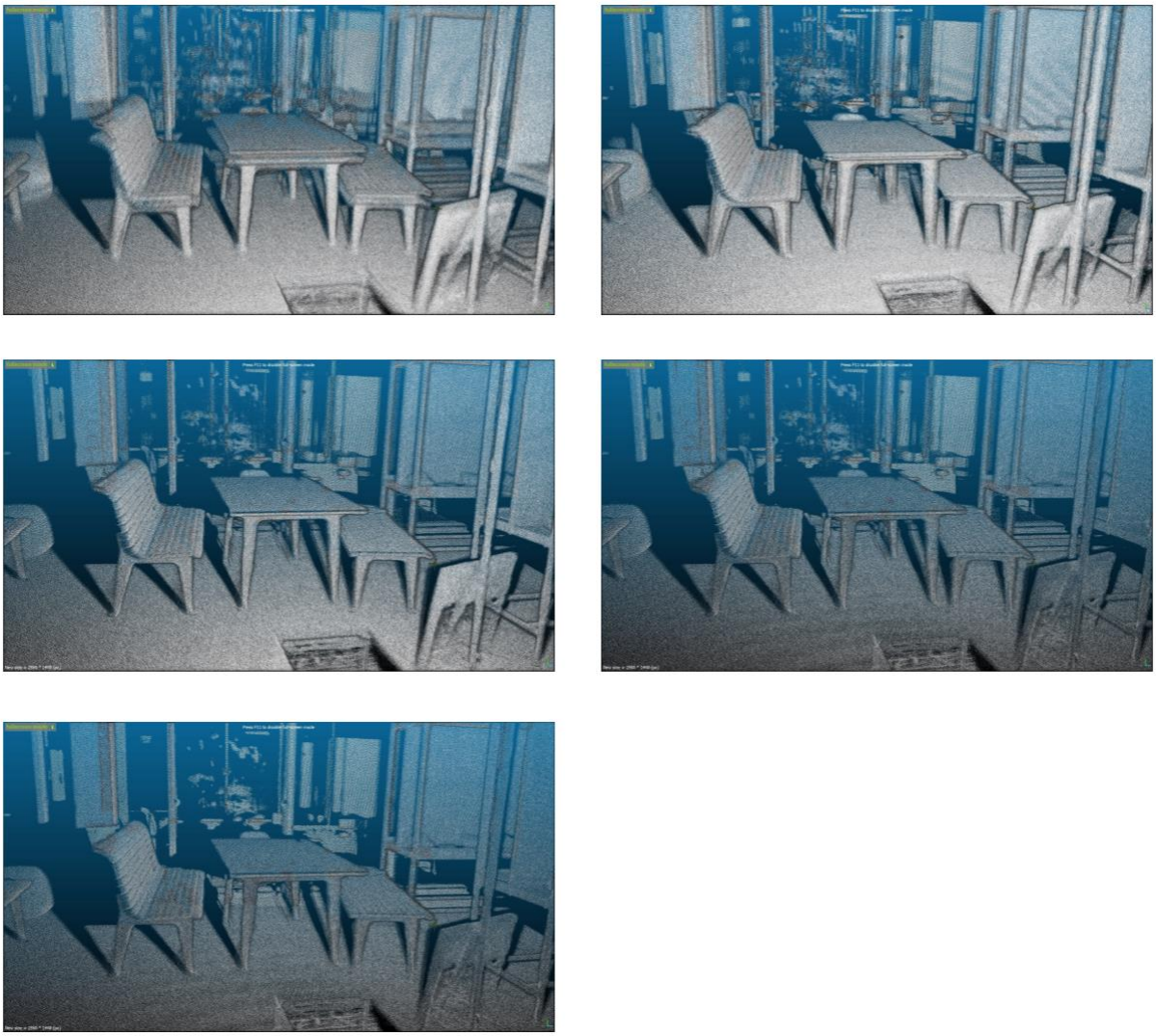


Figure 32a à 32e: Visualisation des différentes étapes effectuées lors de la calibration du système.

La figure 32a représente la scène après l'alignement des différentes images produites par le VLP-16 au cours du scan. Nous pouvons observer une espèce de flou provoqué par le dédoublement de la scène. Cet effet est dû au fait que la scène est scannée à deux reprises pendant une seule acquisition, car le lidar scanne la scène à 360 degrés et de chaque côté du système (en x positif et négatif par rapport au repère du lidar, voir la figure 24 dans la méthode). Aucun traitement n'a encore été effectué, donc les paramètres α1 et α2 sont fixés à 0. La figure 32b montre la scène après avoir appliqué les paramètres de calibration définis à l'aide de la calibration automatique ; un léger flou est cependant encore existant, il est provoqué par la superposition des points provenant des deux côtés du lidar qui n'est pas tout à fait exacte. La figure 32c montre la scène où seuls les points contenant des valeurs positives sur x ont été sélectionnés. Cela permet de retirer le flou existant. La figure 32d montre la scène après un sous-échantillonnage à 0.005m, la densité de points est donc légèrement réduite. La figure 32e montre le résultat de la scène après avoir appliqué un filtrage du bruit, la différence est très légère avec la figure 32d mais nous pouvons constater que certains points ont été supprimés en zoomant dans le scan.

Tableau 2 : nombre de points contenus dans la scène pour chacune des étapes de calibration et de traitement des données.

Étape	Nombre de points
Fichier non calibré	65'467’974
Fichier calibré	65'467’974
Conservation que de la moitié du scan	32'385’656
Sous-échantillonnage à résolution de 0.005m	11'769’322
Réduction du bruit (20 voisins, sigma = 2)	11'407’772

4.1.2 Effets de la calibration par rapport à un plan théorique

Une parcelle d’un couloir dans le bâtiment Géopolis d’environ 23m sur 1.5 m a été extraite de la scène de la figure 27. Cette parcelle a ensuite été étudiée en fonction des étapes effectuées pendant la calibration et le filtrage des données. Pour chaque étape, un plan représentant au mieux la surface du couloir a été calculé. Ensuite, la distance du plan à chaque point appartenant à la parcelle a été mesurée afin de produire un graphique montrant l’évolution de l’erreur en fonction de la distance de scan et un histogramme des erreurs (figure 33 à 37).

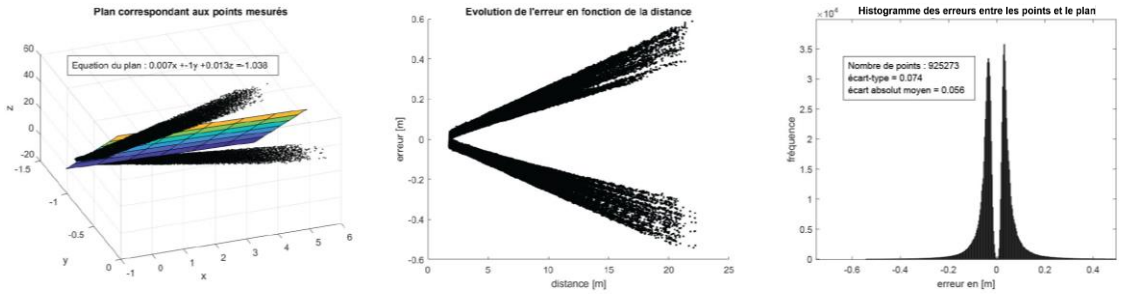


Figure 33a à 33c : Répartition des points selon un plan théorique avant la calibration du système

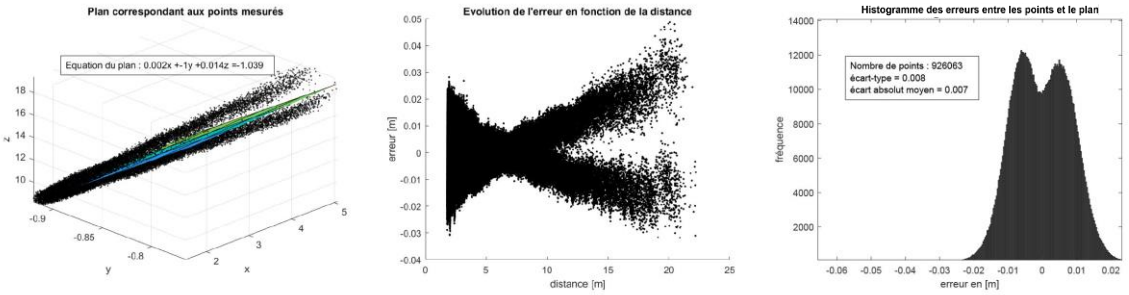


Figure 34a à 34c : Répartition des points selon un plan théorique après la calibration du système

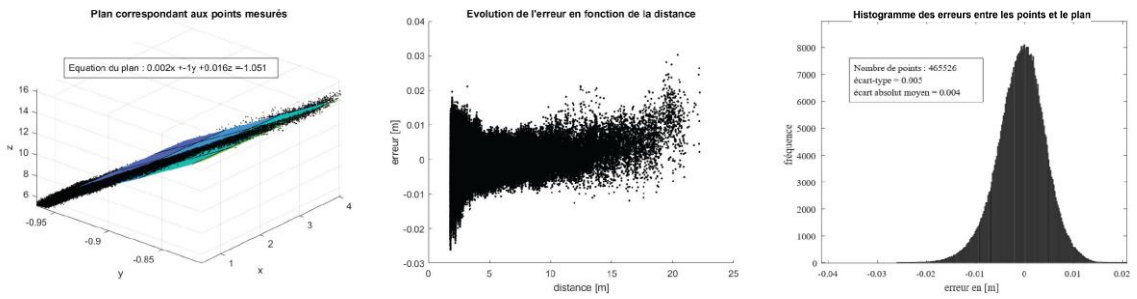


Figure 35a à 35c : Répartition des points selon un plan théorique après la sélection des valeurs positives sur l'axe x.

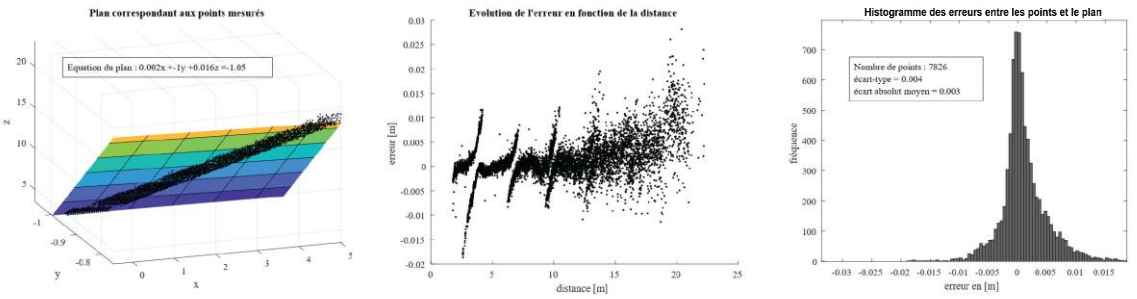


Figure 36a à 36c : Répartition des points selon un plan théorique après le sous-échantillonnage à 0.005m

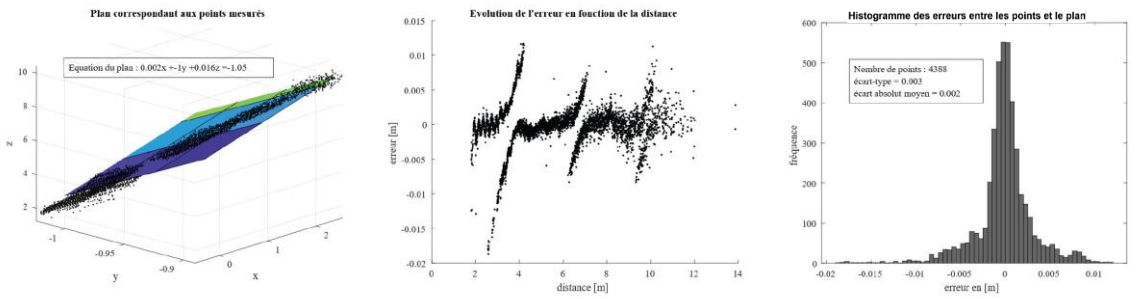


Figure 37a à 37c : Répartition des points selon un plan théorique après la réduction du bruit

4.1.3 Evaluation de la distance entre deux scènes identiques

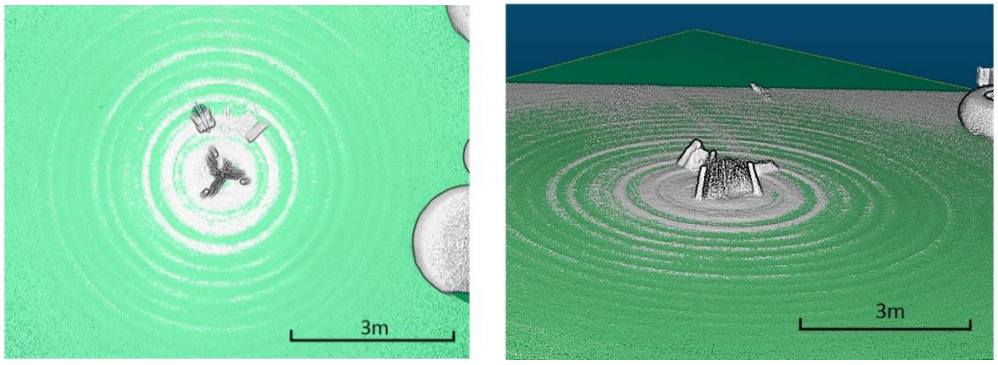
Le tableau 3 évalue la capacité du système à reproduire le même nuage de points selon quatre vitesse de scan. Pour chaque vitesse, deux scans ont été effectués dans le couloir central du Géopolis, ensuite la distance entre chacun des deux scan est évaluée. La moyenne et l'écart-type entre l'ensemble des points sont calculés.

Tableau 3 : Moyenne et écart-type des distance mesurée en chaque paire de nuages de points pour des durées de 36s, 1min, 2min et 6min.

Temps de scan	***36s***	***1min***	***2min***	***6min***
Distance moyenne [m]	*0.0581*	*0.0167*	*0.0145*	*0.0108*
Ecart-type [m]	*0.169*	*0.0248*	*0.132*	*0.0343*

4.1.4 Mise en évidence de l'artéfact produit par le lidar

À la suite de la production de scans, des vaguelettes entourant le lidar ont été remarquées. Les figures suivantes montrent cet effet dans l'exemple du Géopolis, d'abord vu depuis le haut (figure 38) et ensuite vu depuis face (figure 35).



Figures 38a et 38b : mise en évidence de l'artéfact rencontré lors de la prise de mesure. Dans cet exemple, le plan théorique sur lequel est posé de lidar est représenté en vert. Nous pouvons constater la présence de petites vagues dans le nuage de points (en blanc)

4.2 Assemblage de scans dans le Géopolis

4.2.1 Qualité des scans

Les figures 39 et 40 donnent un aperçu de deux scans effectués dans le Géopolis après calibration. Il est à noter que les nuages n'ont pas été nettoyés, nous pouvons donc observer que le capteur s'est scanné lui-même, en outre, les nuages de points n'ont pas été filtrés (présence de bruit). De plus, la photo et le scan n'ont pas été pris le même jour, nous pouvons donc remarquer le déplacement de certains éléments de mobilier, surtout dans la figure 40.

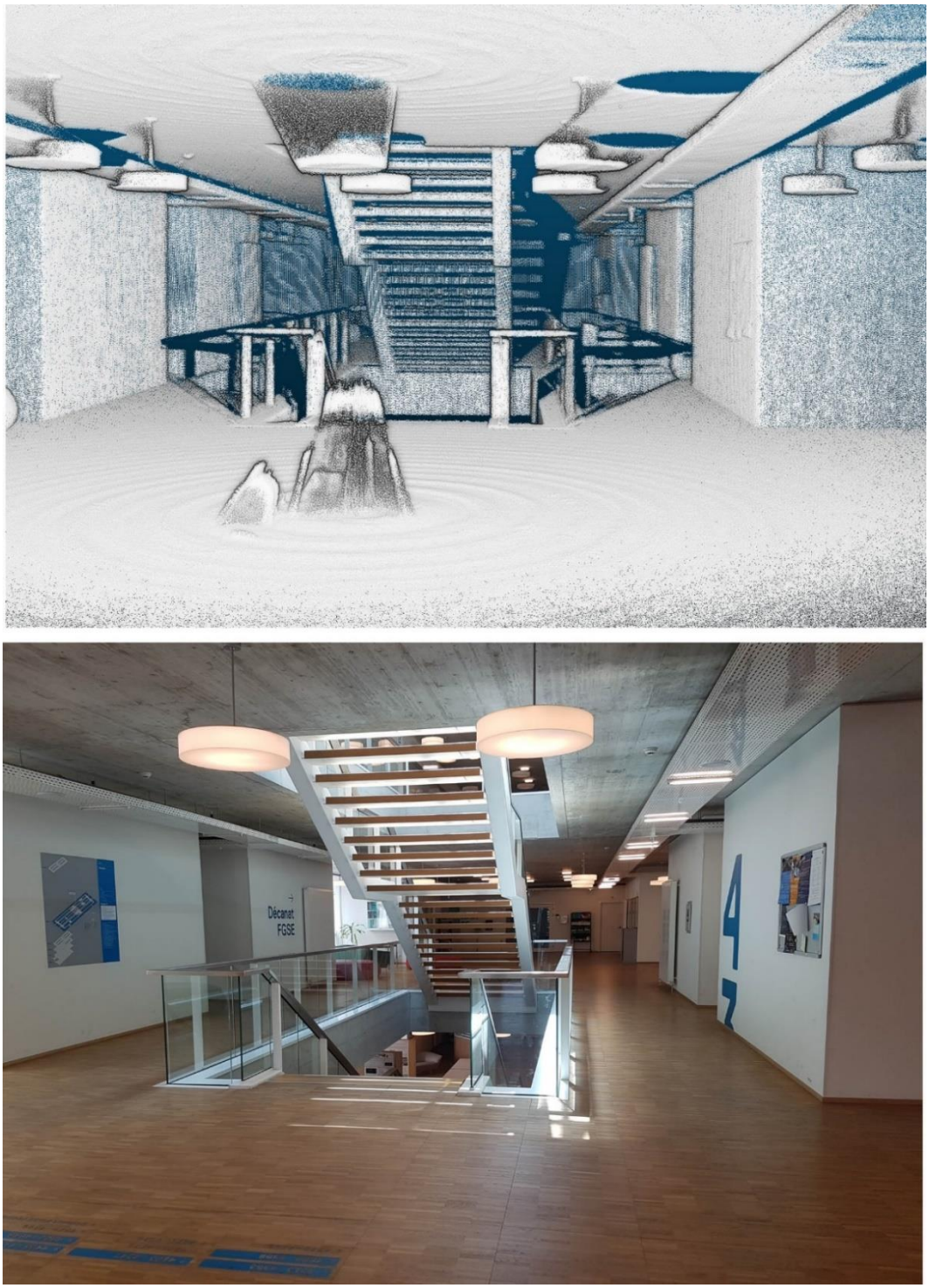


Figure 39 : Cage d'escalier au 4e étage du Géopolis. Comparaison entre le nuage de points et la photo.

Figure 40 : Zone repos au 4e étage du Géopolis. Comparaison entre le nuage de points et une photo.

4.2.2 Assemblage dans le Géopolis

Les figures 41 et 42 représentent l'assemblage de nuages de points effectué au 4e étage du Géopolis. Quatre scans ont été assemblés afin de représenter l'ensemble de la scène. La figure 41 montre une vue du haut des différents positionnements du système lidar. La figure 42 montre une coupe vue de face. Ces deux mêmes figures sont aussi présentées dans les annexes 5 avec les points colorés en fonction de l'emplacement du système lidar. Le tableau 3 présente les distances séparant les différents emplacements du système. Les matrices de transformation permettant l'alignement des différents scans peuvent être retrouvées dans les annexes 6.

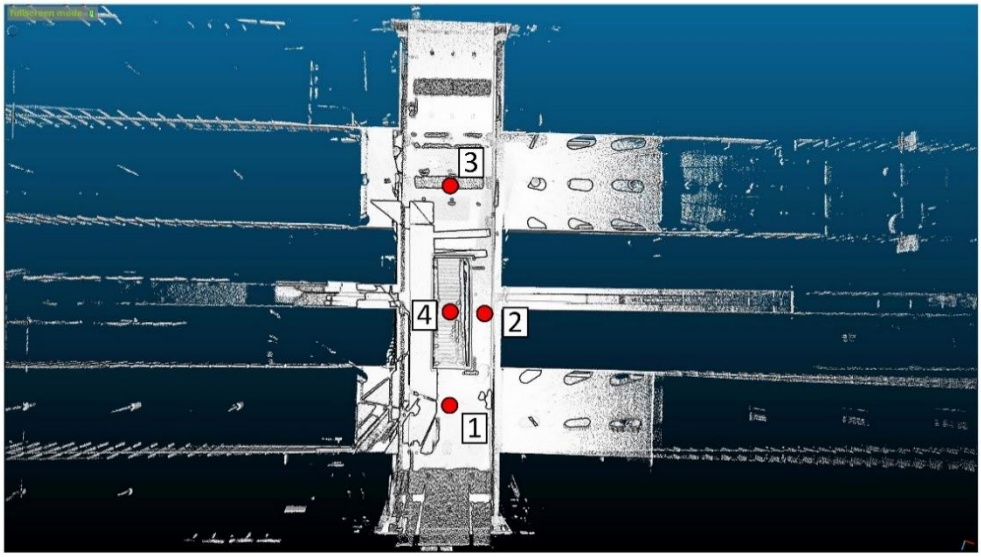


Figure 41 : Vue depuis le haut de l'assemblage effectué dans le Géopolis

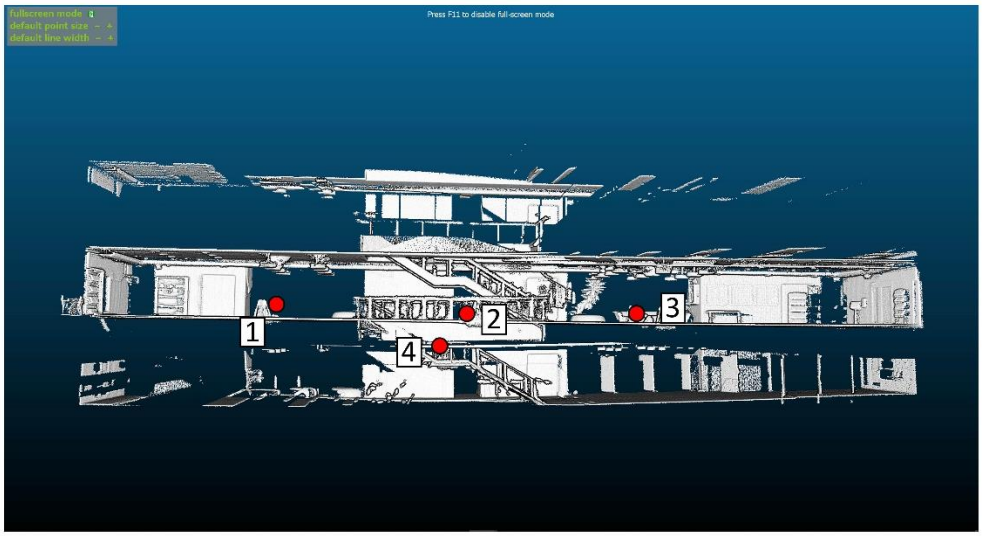


Figure 42 : Coupe vue de face des assemblages effectués dans le Géopolis

Tableau 4 : Distance entre les différents emplacements de scan

Distance entre les stations	Scan 1	Scan 2	Scan 3	Scan 4
Scan 1	0	10.05 m	18.83 m	8.77 m
Scan 2	10.05 m	0	9.35 m	3.45 m
Scan 3	18.83 m	9.35 m	0	10.47 m
Scan 4	8.77 m	3.45 m	10.47 m	0

Comme les paramètres de calibration ont été réévalués après chaque scan, la figure 43 suivante montre l'évolution des paramètres α1 et α2 après calibration automatique au fil des quatre scans effectués dans le Géopolis. Pour la calibration, l'entièreté des scans sont utilisés. Les valeurs des paramètres peuvent aussi être retrouvée dans l'annexe 7 sous forme de tableau.

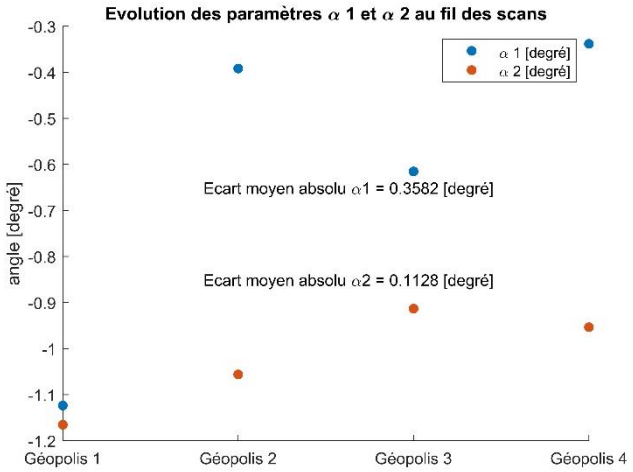
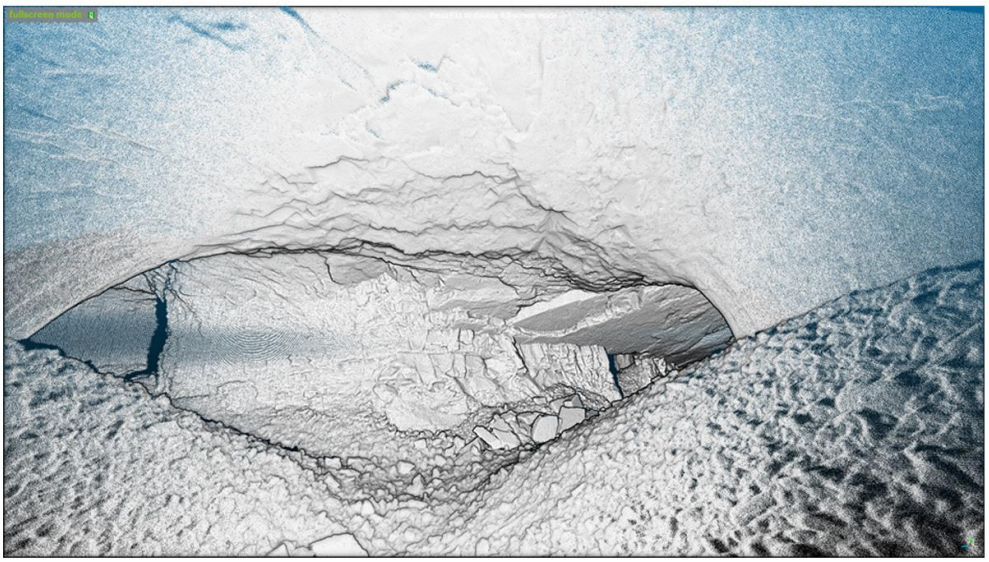


Figure 43 : Évolution des paramètres de calibration à la suite des scans

4.3 Assemblages aux mines de Baulmes

4.3.1 Qualité des scans

Les figures ci-dessous montrent deux exemples de scans effectués dans les mines de Baulmes. La figure 44 montre un aperçu d'un des scan effectués dans les mines de Baulmes. Nous voyons ici une galerie se séparant en deux à une distance d'environ 15m de la prise de vue. La figure 44b montre la même scène cette fois-ci en représentant l'élévation par rapport au lidar en couleurs.



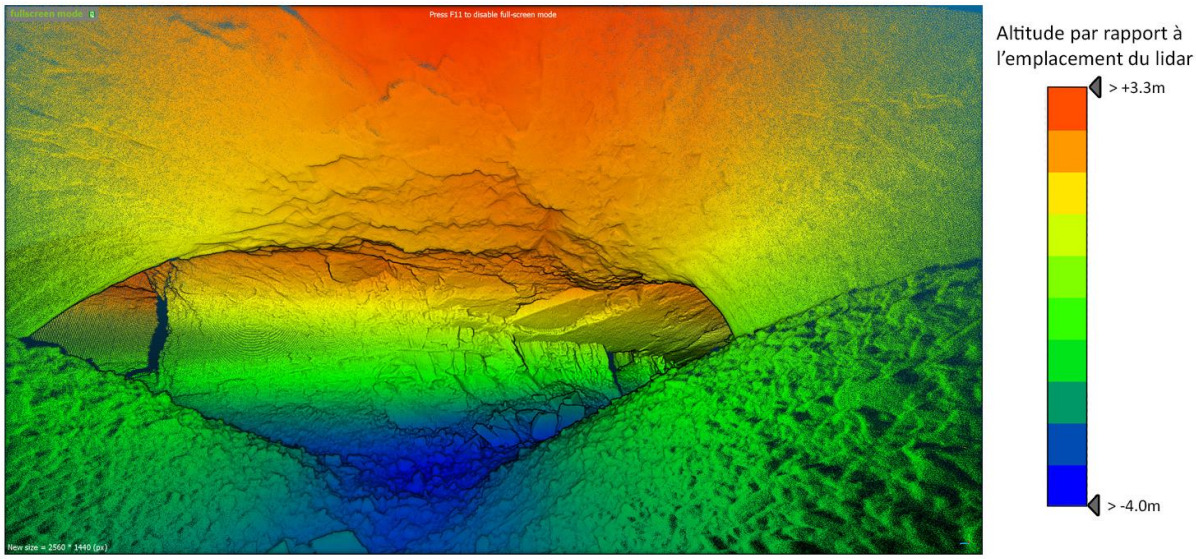


Figure 44a et 44b : Aperçu d'un scan effectué aux mines de Baulmes. Les deux images représentent la même scène, celle du bas représente l'élévation par rapport à l'emplacement du lidar

La figure 45a représente un scan d'une autre galerie. Nous pouvons constater la présence du système lidar au premier plan. La même scène est représentée dans la figure 45b où la distance relative à l'emplacement est cette fois-ci représentée en couleur. Cette galerie s'étend sur une distance d'environ 50 mètres.

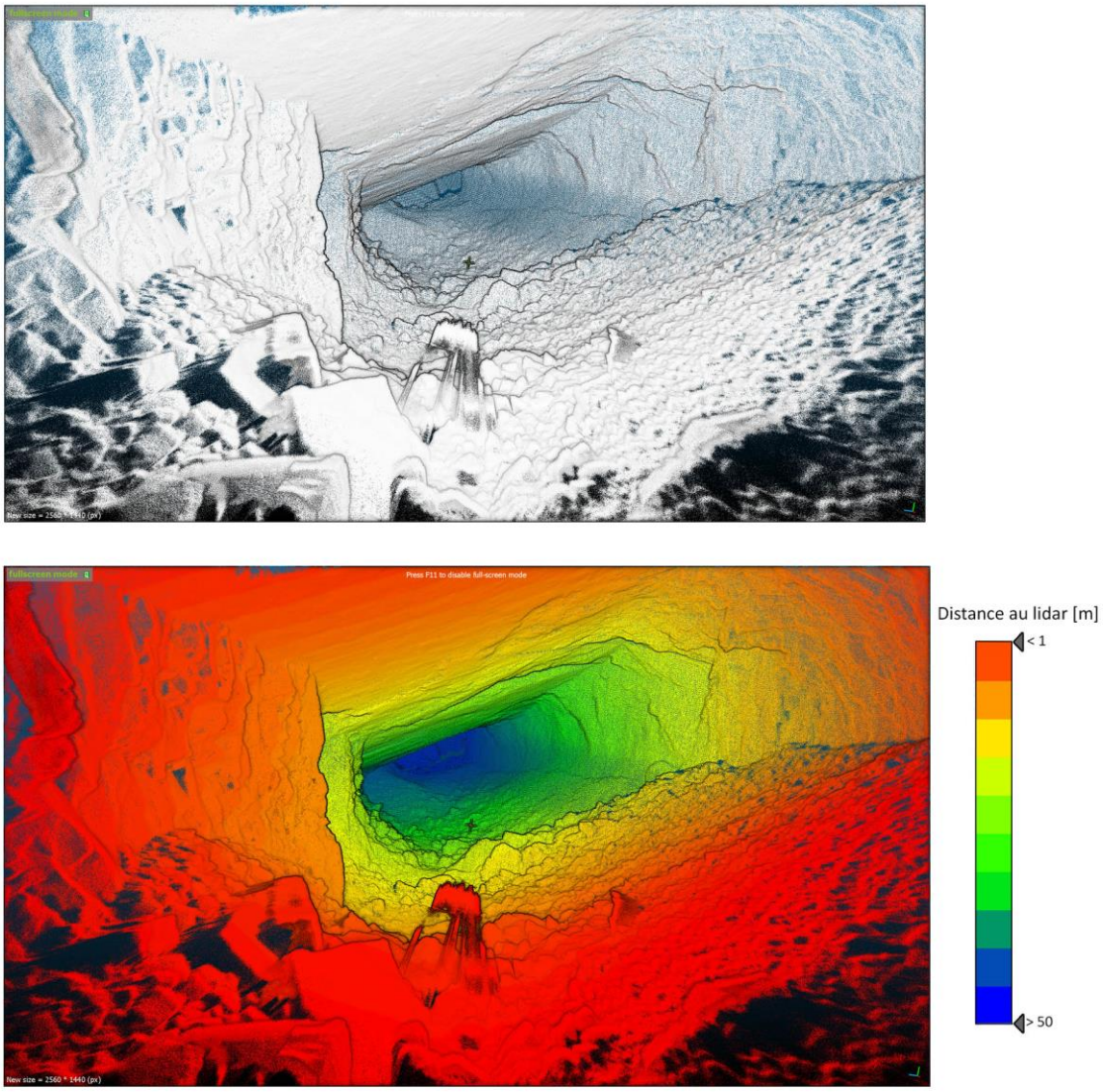


Figure 45a et 45b : Représentation d'un deuxième scan effectué dans les mines de Baulmes. Les deux images représentent la même scène, celle du bas montre la distance des points au lidar.

4.3.2 Assemblage des scans

Les figures 46 montrent les étapes nécessaires pour l'alignement entre deux scans. Il s'agit là de l'alignement effectué entre le premier (nuage de points blanc) et le second (nuage de points jaune) scan des mines de Baulmes.

La figure 46a montre un alignement grossier fait à la main entre les deux scans. La figure 46b montre la sélection des zones communes des deux scans avant leur alignement. La figure 46c montre le résultat de l'alignement entre les deux parties de scans. Enfin, la figure 46d montre le résultat final de l'alignement entre les deux scans, après application de la transformation nécessaire à l'ensemble du scan.

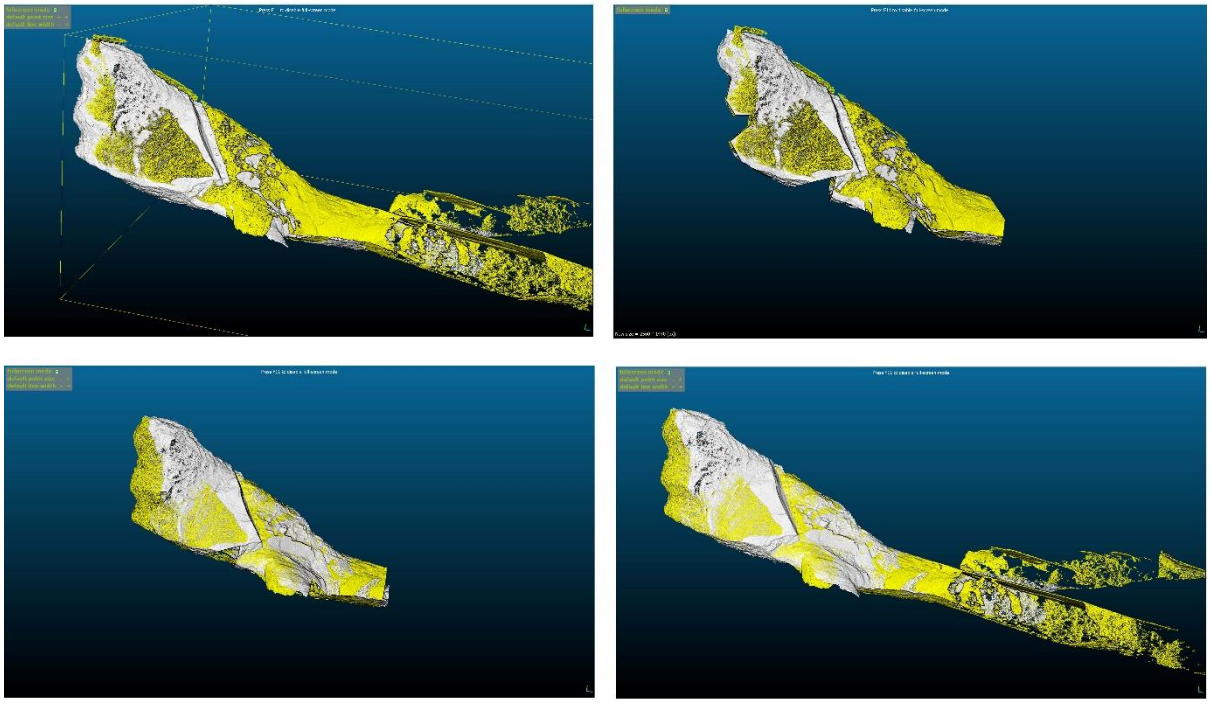


Figure 46a à 46c : Illustration des étapes permettant l'assemblage de deux scans effectués dans les mines de Baulmes.

Les figures 47 et 48 montrent une vue globale des assemblages effectués dans les mines de Baulmes. Nous pouvons observer dans la figure 47 que seuls deux scans sont assemblés, la distance séparant les deux emplacements des scanneurs est de 19.9m. La figure 48 montre l'assemblage de 4 scans (numéros 3 à 6). Afin de visualiser l'emplacement des stations, le plafond de la mine a été retiré.

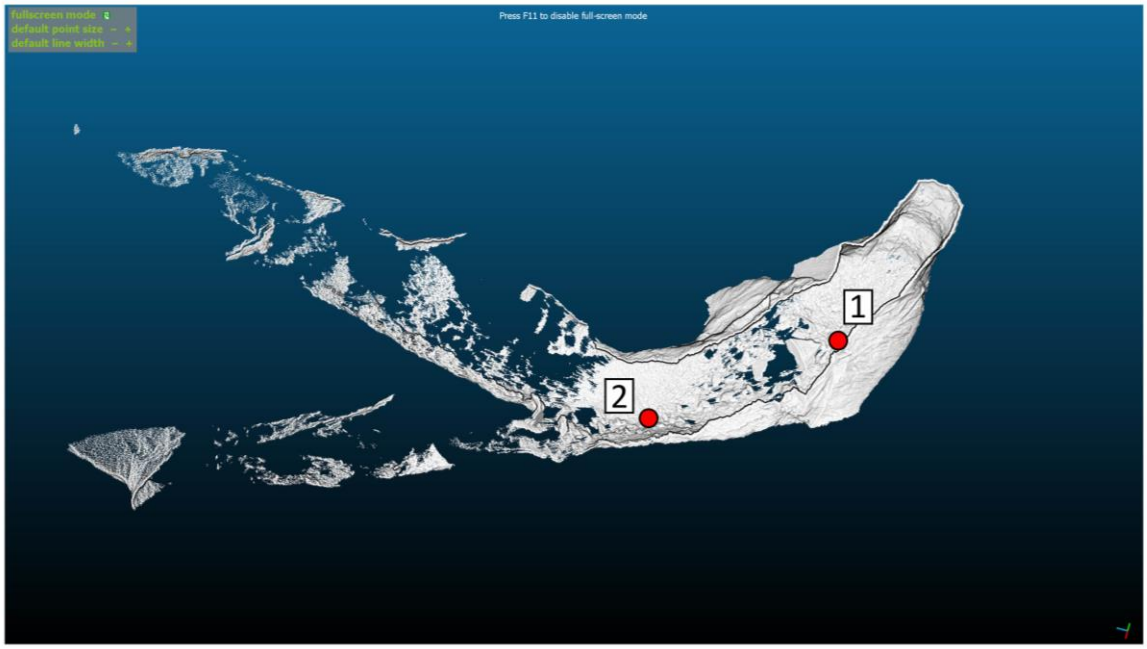


Figure 47 : Vue globale des assemblages des deux premiers scans dans les mines

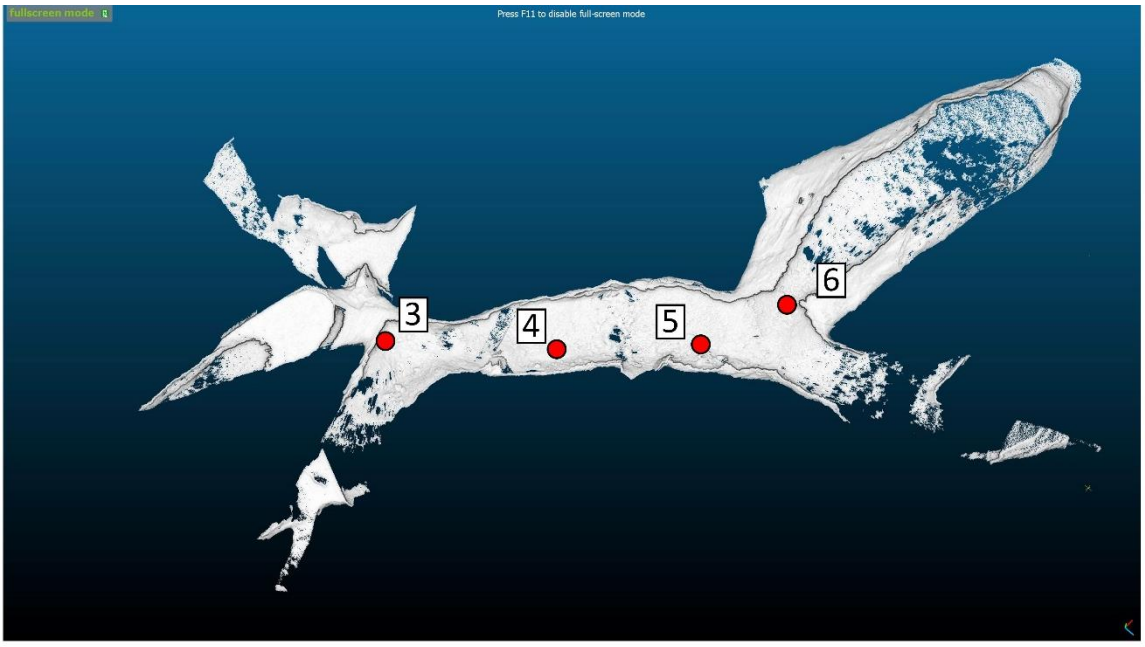


Figure 48 : Vue globale des assemblages de 4 scans suivants effectués dans les mines de Baulmes

Le tableau 5 répertorie les distances en chacun des scans. Ces distances ont été mesurée sur CloudCompare à la suite de l'assemblage effectué.

Tableau 5 : Distance entre les différents emplacements de scans

Distance entre les stations	Scan 3	Scan 4	Scan 5	Scan 6
Scan 3	0	16.68 m	31.53 m	41.22 m
Scan 4	16.68 m	0	14.92 m	24.61 m
Scan 5	31.53 m	14.92 m	0	10.46 m
Scan 6	41.22 m	24.61 m	10.46 m	0

Les paramètres de calibration ont été réévalués après chaque scan. La figure 49 montre l'évolution des paramètres α1 et α2 après calibration automatique au fil des quatre scans effectués dans les mines de Baulmes. Une certaine continuité dans leur évolution a été observée.

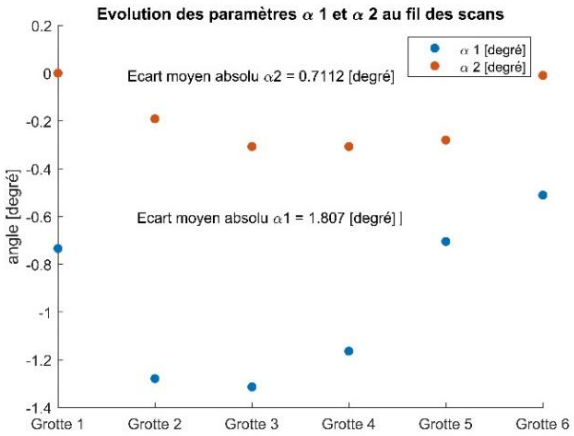


Figure 49 : Évolution des paramètres de calibration à la suite des scans

La figure 50 montre une vue de l'intérieur de l'assemblage des 4 nuages de points. Les couleurs correspondent à chaque emplacement de scans.

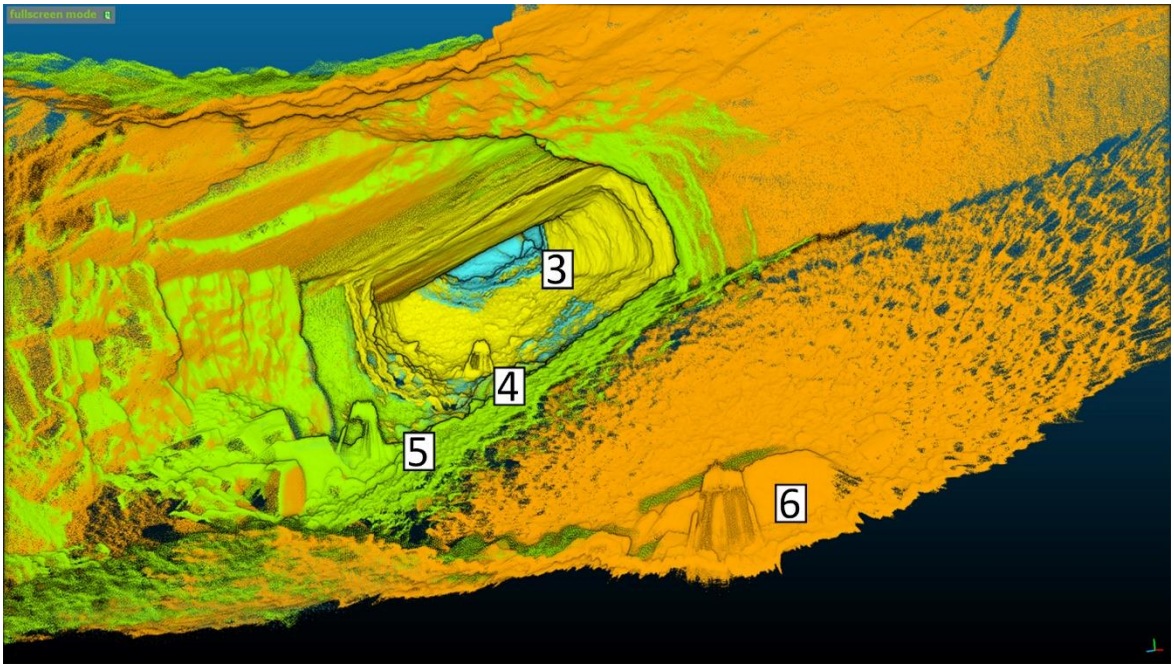


Figure 50 : Représentation de l'intérieur des mines de Baulmes. Les couleurs permettent de relier les points aux emplacements du lidar.

4.3 Assemblage en forêt

Les figures 51 et 52 présentent les résultats obtenus lors des deux scans effectués en forêt à proximité de Verand Bois Genoud. La figure 51 présente d'abord la qualité de scan obtenu à l'aide du système, une fois représenté en blanc et une fois représenté en couleur qui correspond à l'altitude relative au lidar.

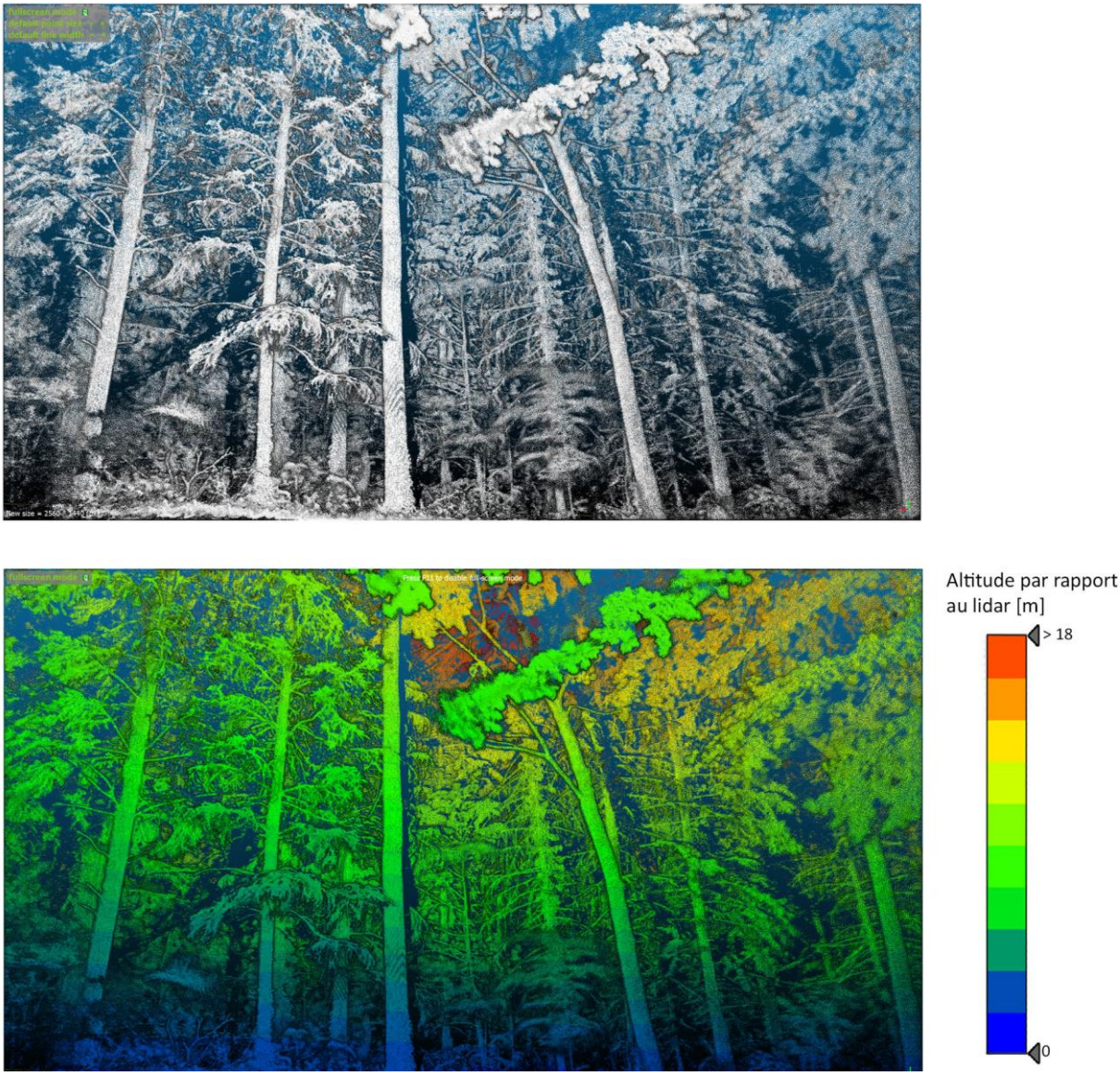


Figure 51a et 51b : Résultat du scan en forêt. La couleur des points de la seconde image représente l'élévation par rapport au lidar.

Ensuite, la figure 52 présente la qualité de l'alignement entre les deux scans effectué en forêt. Le premier scan est représenté en jaune, le second scan est représenté en blanc. Nous pouvons constater que la superposition des zones communes aux deux scans n'est pas parfaite à certains endroits.

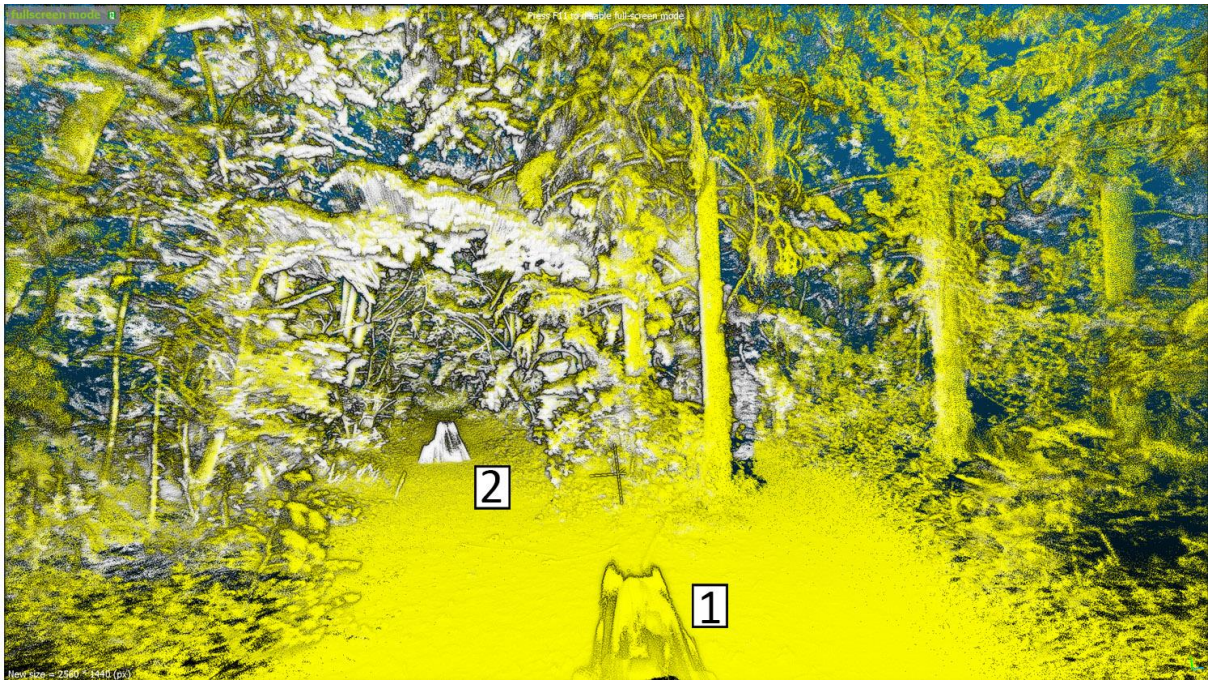


Figure 52 : Représentation du résultat de l'assemblage des nuages de points pour deux scans effectués en forêt.

4.4 Comparaison du Geoslam et du Velodyne ICP, exemple du Géopolis

Les figures 53 à 55 montrent le scan effectué au 4e étage du Géopolis à l'aide du ZUB-REVO de GeoSLAM. Les couleurs représentent le champ scalaire résultant du calcul des distances à l'assemblage du Géopolis présenté au chapitre 4.2. Les points représentés en blancs sont des points se situant à moins de 2cm du scan de l'assemblage du Géopolis. La distance maximale a été fixée à 10 centimètres de différence entre les scans et est représentée en rouge. La distance moyenne entre les deux nuages de points a été mesurée dans CloudCompare et se trouve dans le tableau 6.

Figure 53 : Représentation de la cage d'escalier direction sud obtenue à l'aide du GeoSLAM , et en couleurs les distances avec les assemblages effectués à l'aide du VLP-16.

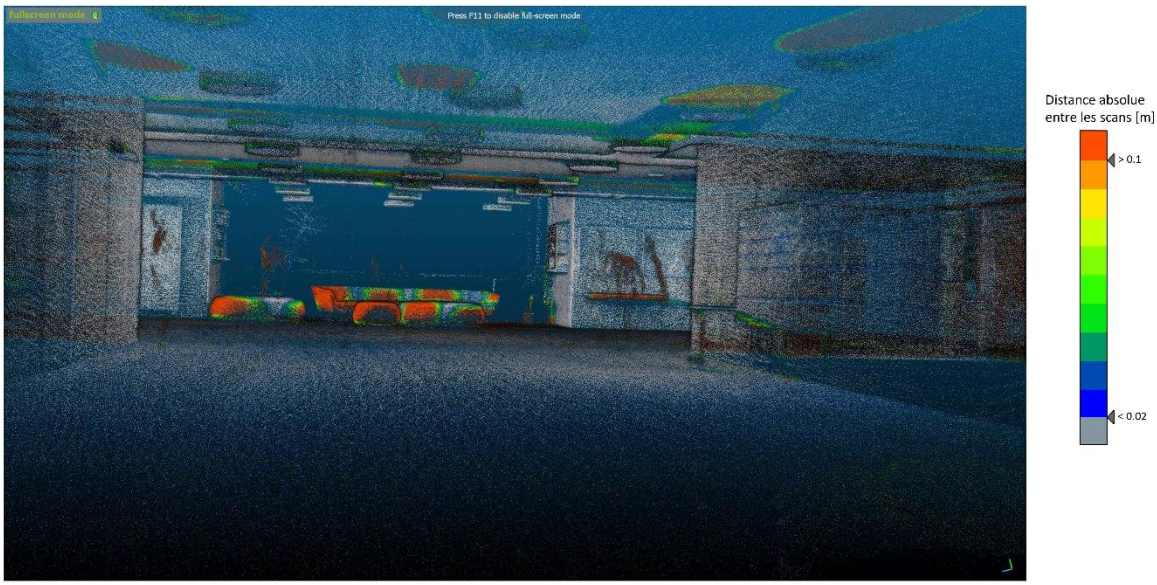


Figure 54 : Représentation de l'espace de repos obtenue à l'aide du GeoSLAM, et en couleurs les distances avec les assemblages effectués à l'aide du VLP-16

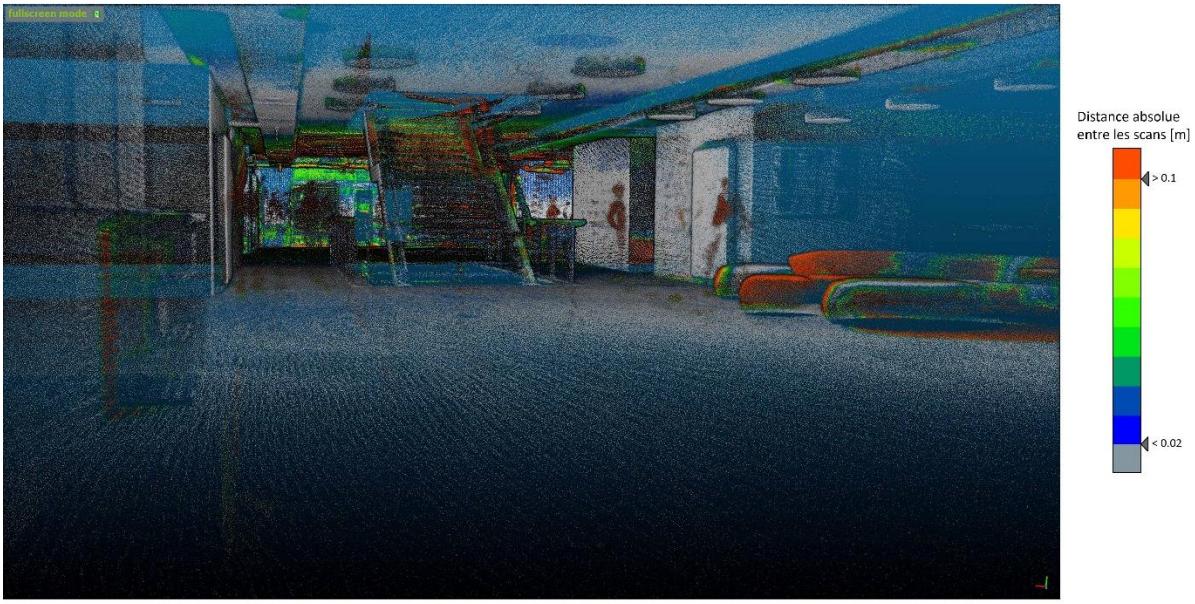


Figure 55 : Représentation de la cage d'escalier direction nord obtenue à l'aide du GeoSLAM, et en couleurs les distance avec les assemblages effectués à l'aide du VLP-16

Le calcul des distances entre les points provenant de l'assemblage et ceux provenant du GeoSLAM ont été effectué à l'aide de CloudCompare. La distance moyenne entre les deux nuages de points ainsi que l'écarts-types de ces distances sont représentés dans le tableau 6.

Tableau 6 : Moyenne et écarts des distances mesurées entre les deux nuages de points

Distance moyenne [m]	**Écart-type [m]**
0.0616	0.1991

5. Discussion

5.1 Calibration

À la différence d'un modèle de lidar terrestre traditionnel où tous les éléments sont préalablement dimensionnés, il a été nécessaire de mettre en place un moyen permettant l'utilisation des données produites par le lidar. Comme le montre les figure 32 la calibration est une étape fondamentale pour produire une modélisation 3D fidèle d'un environnement.

Pendant la prise des premières mesures à l'aide du système lidar, les paramètres de calibration étaient encore inconnus. C'est de manière empirique que nous avons remarqué que la calibration manuelle, c'est-à-dire l'alignement entre l'axe vertical du lidar et l'axe de rotation du moteur n'était pas suffisante et provoquait de grandes erreurs de mesures pour les points les plus éloignés du système. Il a ainsi été nécessaire de calibrer le système à la suite des acquisitions in-situ.

Comme le VLP-16 Puck a la particularité de pouvoir scanner l'environnement en continu et à 360 degrés, il a été possible de comparer les images produites des deux côtés du lidar d'un même scan pour permettre la calibration du système. L'utilisation d'un environnement comportant une géométrie bien définie (scan dans le bâtiment Géopolis) a permis la compréhension de l'influence des paramètres de calibration dans l'image finale produite. La validation du choix des paramètres a aussi été facilitée par la géométrie du lieu (respect des angles et des surfaces). La sélection des différentes bandes de mesure que produit le lidar a permis l'ajustement du second paramètre influençant la qualité des données de sortie. En partant du principe que les 16 bandes doivent théoriquement se superposer, il a été possible de déterminer ce paramètre.

5.1.1 Répartition des données non calibrées

Une fois l'influence des paramètres de calibration sur la géométrie de la scène mise en évidence, il est intéressant d'observer leur influence de manière numérique à partir de point scannés sur un même plan (figures 33 à 37).

Sans calibration, la présence de deux ensembles de nuages de points symétriques représentant respectivement les points avec coordonnées positives et négatives sur l'axe x du référentiel du lidar (voir figure 24) montre la nécessité d'adapter l'angle entre l'axe de rotation et l'axe vertical du lidar. Nous pouvons constater que l'erreur de mesure évolue en fonction de la distance du lidar ; la distance au plan théorique passe d'environ ± 4 cm pour les points les plus proches du lidar jusqu'à 59 cm pour les points les plus éloignés (figure 33b). Cet écart s'observe également dans la figure 33a où les deux ensembles de nuage de points tendent à s'éloigner du plan en fonction de la distance au lidar. Au niveau de la répartition des erreurs, la figure 33c montre deux lois gaussiennes centrées sur ± 3 cm, l'écart-type de 7.4 cm peut paraitre faible et provient de l'influence de la forte densité de points à proximité du lidar qui minimise le poids de l'erreur des points les plus éloignés.

En ce qui concerne les paramètres de calibration, nous pouvons retrouver le paramètre $\alpha 2$ correspondant à la moitié de l'angles entre les deux nuages de points (figure 56). Il n'est pas possible de retrouver visuellement le paramètre $\alpha 1$, mais il influence l'espacement entre les différentes bandes de scans comme le montre le cercle bleu de la figure 56.

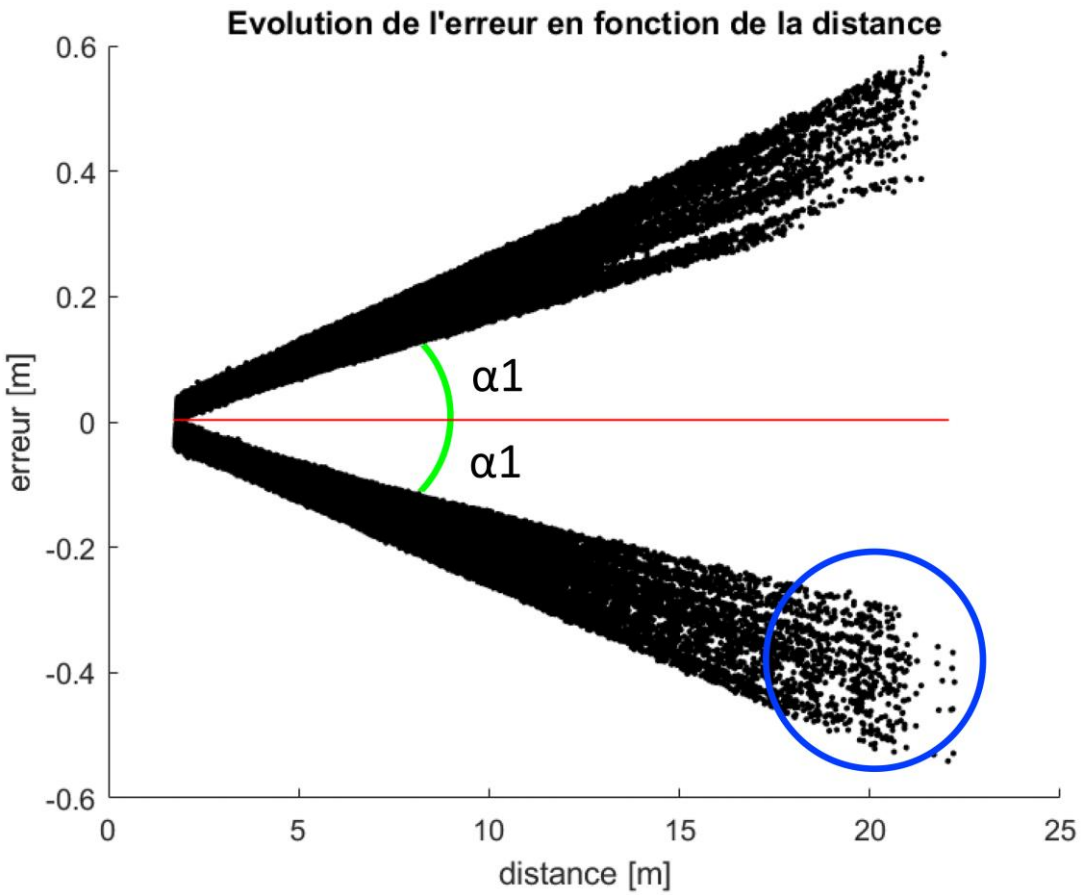


Figure 56 : Influence des paramètres α1 et α2 sur la répartition des points selon un plan théorique.

5.1.2 Répartition des données calibrées

Une fois les paramètres α1 et α2 déterminés, l'évolution de l'erreur a été réévaluée. Comme le montre les figure 34a à 34c, l'ensemble du nuage de points se rapproche de la surface théorique. Nous pouvons constater que l'évolution de l'erreur en fonction de la distance n'est pas constante, l'erreur est d'environ ± 2.5 cm pour les points les plus proches du lidar, retombent à environ +- 1cm à une distance de 7.5 m et finissent par atteindre ± 4 cm pour les points les plus éloignés. Ceci s'explique par la présence de l'artéfact. L'erreur minimal est logiquement présente dans l'intervalle de points pour lequel le plan théorique a été constitué. Concernant l'histogramme des erreurs, nous constatons toujours la présence de deux lois normales qui sont cette fois plus proches l'une de l'autre (centrées à ± 0.5cm).

Ces résultats montrent que la superposition entre les nuages à x positif et négatif n'est toujours exacte malgré la calibration effectuée. Visuellement, nous pouvons constater un léger flou présent dans les résultats de modélisation à la figure 32b. C'est pourquoi nous avons décidé de ne conserver que la moitié des données, en prenant que les points aux coordonnées positives sur l'axe x du référentiel du lidar (voir figure 24). Cela a permis d'obtenir des images plus nettes en retirant le flou présent autour des objets scannés. En théorie, une image à 360 degrés pourrait être obtenue après un scan de seulement 180 degrés comme le permet le système lidar. En pratique, de par le petit décalage existant entre les valeurs positives et négatives selon l'axe x, il a été convenu que tout scan serait effectué après une rotation complète du système pour permettre d'avoir une continuité dans la prise de données. De plus, pour la calibration du système, il est

indispensable d'effectuer un scan à 360 degrés, afin de pouvoir déterminer l'angle α2. Si le système était plus stable, un scan à 180 degrés serait suffisant pour la reconstruction de la scène à 360 degrés.

5.1.3 Erreur à proximité du système : origine de l'artéfact

La répartition des données après la sélection des valeurs soit uniquement positives, soit uniquement négatives sur x permet la mise en évidence de l'erreur relativement élevée à proximité du lidar. Comme le montre la figure 35b l'erreur est caractérisée par des petit pics à intervalles réguliers montrant une erreur variant entre ± 2cm pour les points les plus proches du lidar. Cet effet est d'autant plus perceptible une fois la surface filtrée comme le montre la figure 36b où la variation de l'erreur est régulière et finit par s'estomper de par l'augmentation de l'erreur absolue causée par la distance de scan.

Comme le montre la figure 57, la variation de l'erreur est très régulière et se produit environ tous les 3 mètres. De plus, l'erreur passe brusquement de son maxima à son minima. Ces indices nous poussent à penser que l'artéfact ne semble pas être relié par la méthode d'acquisition des scans, mais plutôt du lidar lui-même. Il reste tout de même difficile de déterminer l'origine exacte de cet artéfact d'autant plus que la documentation propre au Velodyne VLP-16 Puck est relativement pauvre.

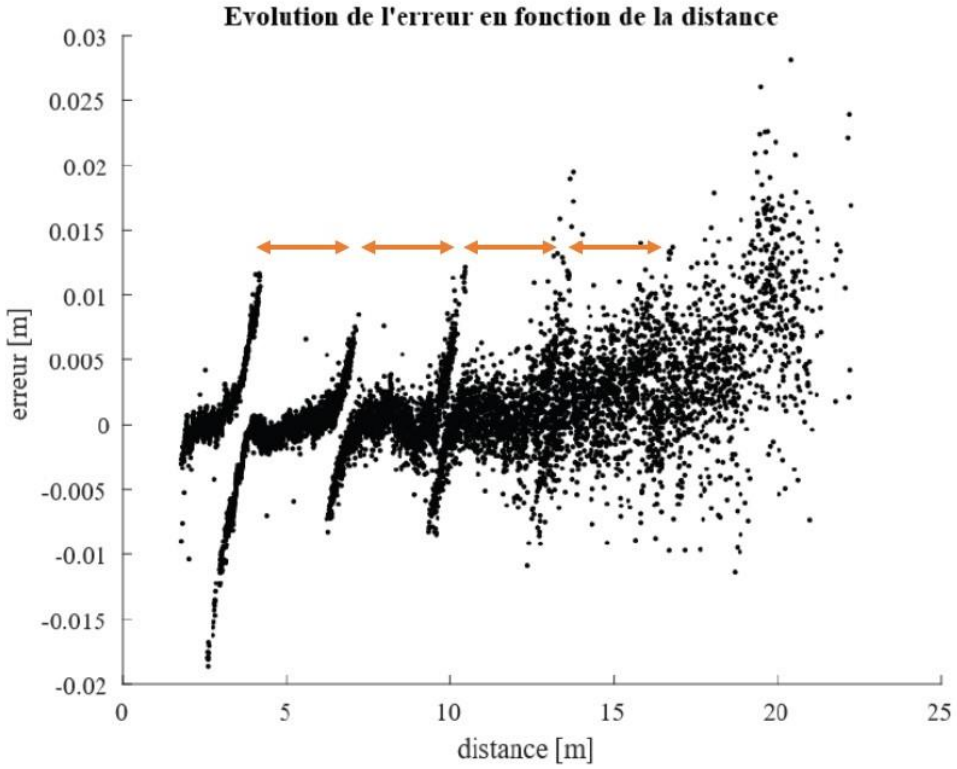


Figure 57 : Représentation de l'erreur régulière remarquée à proximité du système

Au niveau visuel, cet artéfact s'observe facilement dans les résultats des scans à proximité du trépied, encore plus dans les données acquises lorsque le lidar se trouve sur une surface plane comme c'est le cas des scans effectués dans le Géopolis. Les figures 38a et 38b montrent l'influence de cet artéfact sur le scan final. Nous remarquons que l'erreur se propage sous forme de vaguelettes régulières et s'estompe en s'éloignant du lidar. Une hypothèse sur la provenance de cet artéfact serait en lien avec la longueur du bras qui a été mesurée de façon manuelle. Après divers tests, il se trouvent que la longueur du bras n'a pas d'influence sur la répartition de l'erreur mais implique une déformation horizontale de l'image. Ce paramètre n'a donc pas pu être défini de manière automatique. Une autre hypothèse de la provenance de cet artéfact viendrait de la vitesse de scan du système lidar. Cependant, l'artéfact reste constant (même distance et même amplitude entre les vagues) malgré les changements de vitesses de rotation du moteur.

Étant donné que l'erreur semble régulière, il serait imaginable d'effectuer une correction des points aberrants en modifiant chaque points en fonction de la distance au lidar.

5.2 Performances

Selon le site internet du constructeur, le VLP-16 Puck permet une acquisition de données à une distance de 100 mpour une précision de ± 3 cm et ce pour des conditions optimales d'acquisition. Ces conditions restent relativement vagues, mais différents tests de stabilité ont été effectués dans la laboratoire de métrologie, notamment par Glennie, 2016 et nous indique une précision de ± 2 cm pour une distance d'acquisition de 5 mètres à une cible blanche et plane.

Les tests effectués pendant ce travail ont permis d'évaluer les performances du lidar selon un plan théorique produit à l'aide d'une surface plane scannée, en l'occurrence le couloir central du Géopolis. Ces résultats nous donnent une indication quant à l'identification des éventuels biais dans les mesures ainsi que de l'influence de la vitesse de rotation par rapport à la qualité des mesures. Il faut toutefois nuancer ces résultats car aucun modèle exact des scènes scannées n'était disponible. Il a donc été possible de représenter uniquement les résidus reliés à la régression linéaire produite à l'aide de la surface plane représentée par le couloir.

5.3.1 Stabilité du système

Les tests de répétabilité des mesures effectués pour des vitesses de scans allant de 36 secondes à 6 minutes nous montrent que la vitesse du moteur doit être la plus basse possible pour augmenter la qualité des mesures. La distance moyenne entre deux scans effectués diminue, plus le système lidar fonctionne lentement.

Comme le montrent les résultats, le système lidar créé reste relativement instable. Si les différents composants du système avaient été soudé ensemble, la calibration pourrait être moins importante. Cette calibration en post-traitement a permis la suppression des erreurs, cependant nous pouvons constater que les paramètres de calibration varient fortement à chaque scan. En effet, lorsque le lidar est déplacé, les différents éléments installés dans le système (moteur, rotule, contrepoids, trépied) peuvent se dérégler. Par exemple, la vis de serrage permettant de fixer le lidar et régissant le paramètre $\alpha 2$ se dérègle facilement. Tout comme la vis de serrage reliant la rotule au moteur régissant le paramètre $\alpha 1$. Nous pouvons observer ceci dans les figures 43 et 49 relatives aux scans effectués dans le Géopolis et dans les mines de Baulmes où les angles de correction affichent parfois une variation d'environ 1 degré. Nous pouvons noter une certaine continuité dans l'évolution des paramètres $\alpha 1$ et $\alpha 2$ comme le montrent les résultats. Le

paramètre α2 semble plus constant, cela pourrait s'expliquer par le fait que la vis de serrage bouge un peu moins.

5.3 Assemblage des nuages de points

La génération de scans denses et relativement précis a permis l'utilisation d'un algorithme ICP d'alignement de nuages de points. Les alignements des nuages dans différents environnements ont montré l'efficacité de la méthode.

5.3.1 Assemblage dans le Géopolis

Les premiers assemblages effectués dans le Géopolis ont montré de bons résultats. Bien qu'il n'y ait pas eu de validation des résultats possible, nous pouvons constater d'après la visualisation de l'assemblage, que la scène représentée est conforme à la réalité. La géométrie principale du bâtiment (respect des surfaces et des angles) semble appropriée.

Nous pouvons constater qu'il existe à certains endroits des alignements approximatifs entre les scans. Cet alignement moins bon est surtout visible pour les points les plus éloignés des emplacements de scans. Par exemple, la figure 58 montre une zone où les alignements entre les scans les plus éloignés, en l'occurrence les scans 1 et 3 n'est pas parfait. Un écart d'environ 10 cm entre les points verts appartenant au scan 1 et les points bleus appartenant au scan 3 est présent. Ceci est dû au fait qu'il s'agit de points les plus éloignés du lidar (29.8 m pour les points mal alignés) et qui sont, par conséquent plus influencés par une calibration approximative du système. Comme les points partiellement alignés correspondent à une zone scannée par lidar à sa position 1, il est tout à fait possible de les supprimer, car la zone est déjà scannée de manière plus dense par le lidar à sa position 3.

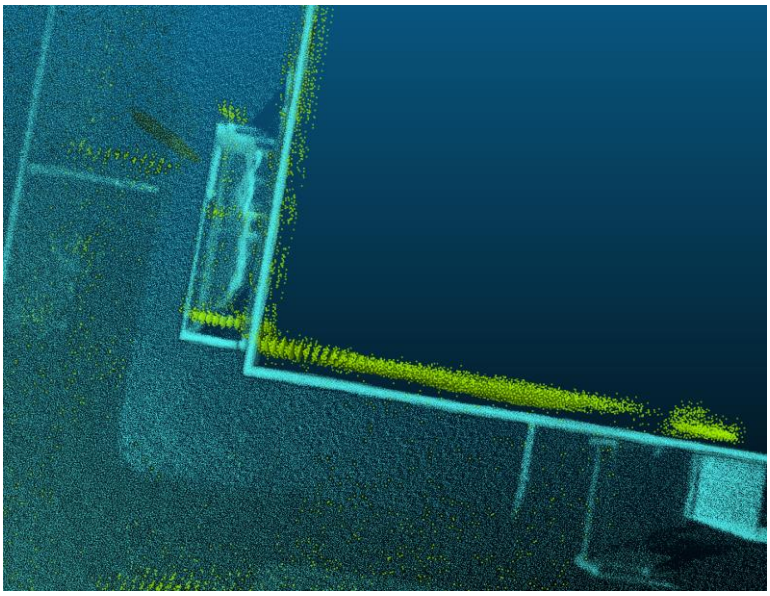


Figure 58 : Zone où l'alignement entre deux scan n'est pas parfait avec en couleurs les points représenté par les deux emplacements de scans.

5.3.2 Assemblage dans les mines de Baulmes

Les scans effectués dans les mines de Baulmes ont pu être assemblés. Initialement, les six scans effectués devaient pouvoir être assemblés en une seule image. Cependant, les scans 1 et 2 n'ont pas pu être reliés aux autres, car la zone commune présente dans chacun des scans était trop petite. De plus, le trépied a été tourné après chaque mesure ce qui a compliqué le repérage des emplacements du lidar.

L'algorithme d'alignement a été effectué pour deux sous-ensembles qui sont les scans 1 et 2, et les scans 3, 4, 5 ,6. Les figures 47 et 48 montrent que l'alignement a été correctement effectué. Tout comme pour l'alignement de scans effectué dans le Géopolis, les points les plus éloignés ont montré des difficultés à s'aligner. La figure 59 illustre ce problème où le scan 3 représenté en bleu avec un grossissement de la taille de points, n'est pas totalement aligné au scan 6 qui est représenté en orange. Les points du scan 3 sont en effet assez éloignés (à environ 45 mètres du l'emplacement du lidar) ce qui implique une plus grande erreur d'alignement. Cette erreur est d'environ 12 cm d'après les mesures effectuées dans CloudCompare. Tout comme pour l'assemblage du Géopolis, ces points peuvent être simplement supprimés car il s'agit de zones déjà scannées mais contenant une plus faible densité de points.

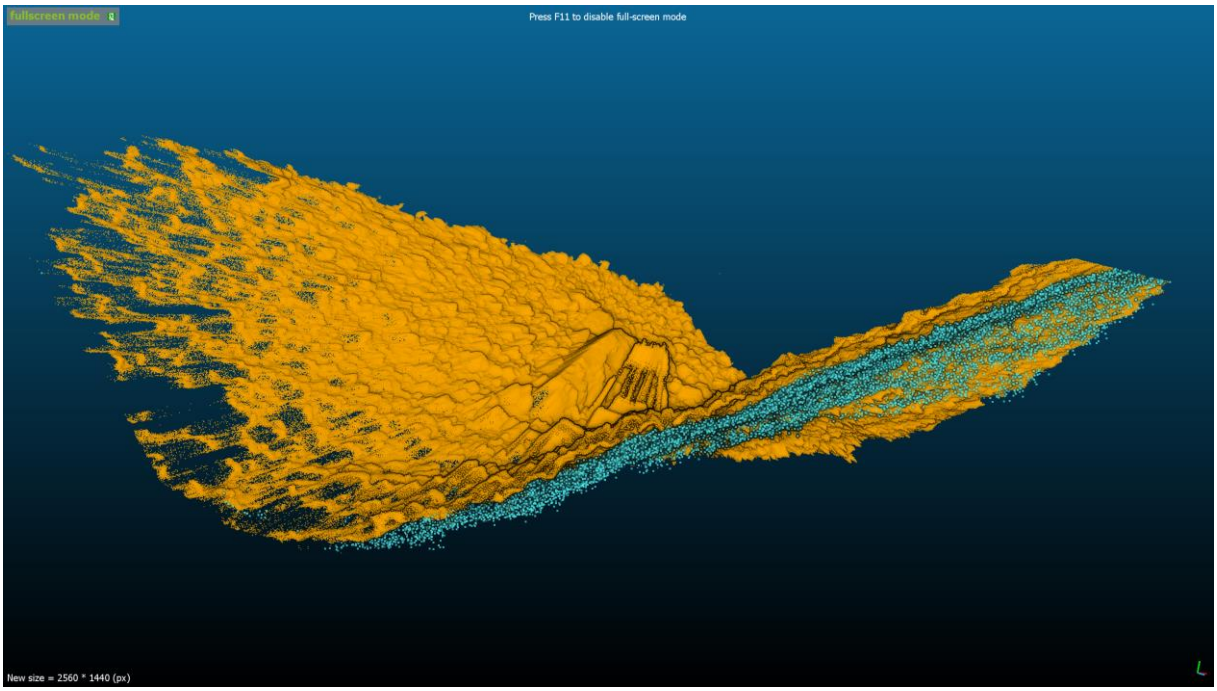


Figure 59 : Alignement approximatif entre les points les plus éloignés du scan 3 et certaines zones du scan 6.

5.3.3 Assemblage dans un milieu forestier

Les derniers tests du système ont été effectués dans un milieu forestier afin de mettre en évidence les éventuelles difficultés que représente un tel environnement. La zone scannée est caractérisée par une forte densité de végétation impliquant la création de nombreuses zones d'ombres. Les deux emplacements de scans étaient relativement proche afin de maximiser les chances d'effectuer un assemblage. Nous pouvons constater que la densification du nuage de points représentés par la figure 51 reste satisfaisante, malgré le vent présent lors des prises de mesures. Concernant l'assemblage des nuages de points, nous pouvons constater qu'il est

approximatif à certains endroits, cela est principalement dû aux difficulté de trouver des zones communes aux deux scan ainsi qu'aux mouvements des branches des arbres provoqués par le vent pendant l'acquisition. Nous constatons tout de même à la figure 52 que l'alignement semble correct pour les plus gros troncs d'arbres et qu'il est approximatif pour les branches.

5.4 Comparaison Geoslam dans le Géopolis

Les scans obtenus avec le système lidar terrestre créé ont été comparés à un scan effectué avec le GeoSLAM utilisant l'algorithme d'alignement SLAM. Il est intéressant de comparer les deux méthodes d'acquisition, car la prise de données ainsi que l'alignement se font selon deux procédés très différents et permettent d'obtenir un résultat similaire.

Une fois que l'alignement entre les scans obtenus à l'aide des deux méthodes a été effectué (utilisation de l'algorithme ICP pour l'alignement), il a été possible de mesurer la distance entre les deux scènes.

Comme premier constat, nous pouvons affirmer que les scans se superposent correctement comme le montre les figures 53 à 55. Les zones blanches de ces figures indiquent une superposition précise à ± 2 cm et composent la majeure partie de la scène, ce qui montre que les deux scans se superposent assez bien. Nous pouvons observer des zones où la distance entre les deux scans est supérieure à 10 cm. Ces zones correspondent à la présence de personnes pendant l'acquisition avec le GeoSLAM ainsi qu'au déplacement du mobilier entre les deux acquisitions qui ont eu lieu à deux semaines d'intervalle. La figure 53 montre une zone chaotique de nuages de points sur la gauche et représente le moment où l'appareil a été calibré avant de commencer les mesures. Ces points impliquent une augmentation de la valeur moyenne de la distance entre les deux scans comme le montre le tableau 6.

Nous pouvons observer que certains murs indiquent une distance relativement élevée entre les deux scans, notamment dans la figure 53 où les murs représentés en vert indiquent une différents d'environ 5 cm. Cette différence entre les scans nous signale la présence d'un biais dans l'une des méthodes d'alignement.

6. Conclusion

Ce travail a permis l'élaboration d'un système lidar terrestre low-cost utilisable dans différents environnements. Le système est composé du lidar VLP-16 de Velodyne et peut réaliser une acquisition rapide et dense d'une scène. La seconde partie du travail a démontré la possibilité d'alignement de plusieurs scans à l'aide d'un algorithme d'alignement (ICP).

Comme l'ont montré les résultats, ce système de confection artisanale implique l'obligation de calibration, et ce pour chaque scan effectué. L'optimisation du matériel, comme la confection d'un moteur plus fiable est envisageable pour un tel projet et pourrait améliorer la qualité des mesures tout en conservant un aspect low-cost. Les résultats obtenus avec ce système sont satisfaisants même si aucune validation des mesures n'a pu être effectuée. L'utilisation du système lidar dans une mine a prouvé sa capacité à être indépendante d'un système de référencement par GPS.

La comparaison avec un système utilisant un algorithme d'alignement SLAM a permis de vérifier la qualité de l'alignement et de mettre en évidence les éventuels biais que présentent les méthodes. L'utilisation de ce système lidar sur des supports mobiles est envisageable. À bord d'un drone et moyennant l'utilisation d'une IMU permettant la correction des mouvements de l'appareil, il serait possible d'effectuer des mesures voire des assemblages.

Cette étude a ainsi démontré que les systèmes lidar permettant une production de données élevée et précise peuvent être utilisés à moindre coût.

7. Bibliographie

Ackermann, F. (1999). Airborne laser scanning—present status and future expectations. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54(2-3), 64–67. doi:10.1016/s0924-2716(99)00009-x

Altmaier, A., & Kany, C. (2002). Digital surface model generation from CORONA satellite images. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, *56*(4), 221-235.

Andy (2019). How many satellites orbiting the earth in 2019 ? Consulté sur https://www.pixalytics.com/satellites-orbiting-earth-2019/

Autonomoustuff. (2018) LiDAR SPECIFICATION COMPARISON CHART. Consulté sur https://autonomoustuff.com/wp-content/uploads/2018/05/LiDAR_Comparison_52118.pdf

Barnea, S., & Filin, S. (2008). Keypoint based autonomous registration of terrestrial laser point-clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *63*(1), 19-35.

Bater, C. W., & Coops, N. C. (2009). Evaluating error associated with lidar-derived DEM interpolation. *Computers & Geosciences*, *35*(2), 289-300.

Besl, P. J., & McKay, N. D. (1992, April). Method for registration of 3-D shapes. In *Sensor Fusion IV: Control Paradigms and Data Structures* (Vol. 1611, pp. 586-607). International Society for Optics and Photonics.

CloudCompare, (2019) Users Manual for Version 2.6.1. Consulté sur http://www.cloudcompare.org/doc/qCC/CloudCompare%20v2.6.1%20-%20User%20manual.pdf

Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, *92*, 79-97.

Daniel, S., & Larouche, C. (2018). GMT-7007: Capteurs actifs. Université Laval, département des sciences géomatiques.

Davis, P. A. (1969). The analysis of lidar signatures of cirrus clouds. *Applied optics*, *8*(10), 2099-2102.

Everaerts, J. (2008). The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for remote sensing and mapping. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *37*(2008), 1187-1192.

Fernandez-Diaz, J., Carter, W., Shrestha, R., & Glennie, C. (2014). Now you see it… now you don't: Understanding airborne mapping LiDAR collection and data product generation for archaeological research in Mesoamerica. *Remote Sensing*, *6*(10), 9951-10001.

GARCÍA, Fernando, JIMÉNEZ, Felipe, NARANJO, José Eugenio, *et al.* Environment perception based on LIDAR sensors for real road applications. *Robotica*, 2012, vol. 30, no 2, p. 185-193.

Geiger, A., Lenz, P., & Urtasun, R. (2012, June). Are we ready for autonomous driving? the kitti vision benchmark suite. In *2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*(pp. 3354-3361). IEEE.

Glennie, C. L., Kusari, A., & Facchin, A. (2016). CALIBRATION AND STABILITY ANALYSIS OF THE VLP-16 LASER SCANNER. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 40.

Han, X. F., Jin, J. S., Wang, M. J., Jiang, W., Gao, L., & Xiao, L. (2017). A review of algorithms for filtering the 3D point cloud. *Signal Processing: Image Communication*, *57*, 103-112.

HENRY, James E. Method of aerial mapping. U.S. Patent No 2,665,481, 12 janv. 1954.

Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M. H., Loye, A., Metzger, R., & Pedrazzini, A. (2012). Use of LIDAR in landslide investigations: a review. *Natural hazards*, *61*(1), 5-28.

Korhonen, L., Korpela, I., Heiskanen, J., & Maltamo, M. (2011). Airborne discrete-return LIDAR data in the estimation of vertical canopy cover, angular canopy closure and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, *115*(4), 1065-1080.

Krabill, W. B., & Martin, C. F. (1987). Aircraft positioning using global positioning system carrier phase data. *Navigation*, *34*(1), 1-21.

Krabill, W. B., Collins, J. G., Swift, R. N., & Butler, M. L. (1980). Airborne laser topographic mapping results from initial joint NASA/US Army Corps of Engineers experiment.

Kumar, R., Samarasekera, S., Hsu, S., & Hanna, K. (2000). Registration of highly-oblique and zoomed in aerial video to reference imagery. In *Proceedings 15th International Conference on Pattern Recognition. ICPR-2000* (Vol. 4, pp. 303-307). IEEE.

Lagarias, J. C., Reeds, J. A., Wright, M. H., & Wright, P. E. (1998). Convergence properties of the Nelder--Mead simplex method in low dimensions. SIAM Journal on optimization, 9(1), 112-147.

Larouche, C., Shahraji, M. H., & Cassol, W. N. (2018). Avancées réalisées en lidar mobile à l'Université Laval.

Lerma, J. L., Navarro, S., Cabrelles, M., & Villaverde, V. (2010). Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation: the Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case study. *Journal of Archaeological Science*, *37*(3), 499-507.

Li, R., Liu, J., Zhang, L., & Hang, Y. (2014, September). LIDAR/MEMS IMU integrated navigation (SLAM) method for a small UAV in indoor environments. In 2014 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS) (pp. 1-15). IEEE.

Lichti, D. D., & Gordon, S. J. (2004). Error propagation in directly georeferenced terrestrial laser scanner point clouds for cultural heritage recording. *Proc. of FIG Working Week, Athens, Greece, May*, 22-27.

Ma, R. (2005). DEM generation and building detection from lidar data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, *71*(7), 847-854.

Mada, S. K., Smith, M. L., Smith, L. N., & Midha, P. S. (2003). . Opto-Ireland 2002: Optical Metrology, Imaging, and Machine Vision. doi:10.1117/12.463773

Mariéthoz, G. (2016a). Télédétection - cours 3 : Interactions ondes-matière. Université de Lausanne, Faculté des géosciences et de l'environnement, Institute of Earth Surface Dynamics (IDYST).

Masuda, T., Sakaue, K., & Yokoya, N. (1996, August). Registration and integration of multiple range images for 3-D model construction. In Proceedings of 13th international conference on pattern recognition (Vol. 1, pp. 879-883). IEEE.

Mathworks. (2019). Computer vision Toolbox: User's Guide (r2019a). Consulté sur : https://ch.mathworks.com/help/images/ref/affine3d.html

Mathworks. (2019). Computer vision Toolbox: User's Guide (r2019a). Consulté sur : https://ch.mathworks.com/help/vision/ref/pcdownsample.html

Mathworks. (2019). Computer vision Toolbox: User's Guide (r2019a). Consulté sur : https://ch.mathworks.com/help/vision/ref/pcdenoise.html?s_tid=doc_ta

Mathworks. (2019). Optimization Toolbox: User's Guide (r2019a). Consulté sur : https://ch.mathworks.com/help/matlab/ref/fminsearch.html

McRoberts, R. E., Næsset, E., & Gobakken, T. (2013). Inference for lidar-assisted estimation of forest growing stock volume. *Remote Sensing of Environment*, *128*, 268-275.

Meng, X., Wang, L., Silván-Cárdenas, J. L., & Currit, N. (2009). A multi-directional ground filtering algorithm for airborne LIDAR. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *64*(1), 117-124.

Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: a review. Applied geomatics, 6(1), 1-15.

Nobili, S., Dominguez, S., Garcia, G., & Philippe, M. (2015, September). 16 channels Velodyne versus planar LiDARs based perception system for Large Scale 2D-SLAM. In *7th Workshop on Planning, Perception and Navigation for Intelligeng Vehicles*.

NORTHEND, C. A., HONEY, R. C., et EVANS, W. E. Laser radar (lidar) for meteorological observations. *Review of Scientific Instruments*, 1966, vol. 37, no 4, p. 393-400.

Orts-Escolano, S., Morell, V., García-Rodríguez, J., & Cazorla, M. (2013, August). Point cloud data filtering and downsampling using growing neural gas. In *The 2013 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)* (pp. 1-8). IEEE.

Petrie, G., & Toth, C. K. (2008). Introduction to laser ranging, profiling, and scanning. *Topographic laser ranging and scanning: Principles and processing*, 1-28.

Pouliot, J. (2018). GMT-7006: Modélisation et Géovisualisation 3D. Université Laval, département des sciences géomatiques.

Pouliot, J., Larrivée, S., & St-Pierre, È. (2015). GMT-7000: Intégration des données spatiales: concepts et pratique. Université Laval, département des sciences géomatiques.

R. F. (2018). Real-time positioning in logging: Effects of forest stand characteristics, topography, and line-of-sight obstructions on GNSS-RF transponder accuracy and radio signal propagation. *PloS one*, *13*(1), e0191017.

Reitberger, J., Schnörr, C., Krzystek, P., & Stilla, U. (2009). 3D segmentation of single trees exploiting full waveform LIDAR data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *64*(6), 561-574.

RIEGL Laser Measurement Systems Gmbh. (2019). RIEGL VQ-480 II. Consulté sur http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/RIEGL_VQ-480II_Datasheet_2019-05-20_01.pdf

Royán, M. J., Abellán, A., Jaboyedoff, M., Vilaplana, J. M., & Calvet, J. (2014). Spatio-temporal analysis of rockfall pre-failure deformation using Terrestrial LiDAR. *Landslides*, *11*(4), 697-709.

Rusinkiewicz, S., & Levoy, M. (2001, June). Efficient variants of the ICP algorithm. In *3dim* (Vol. 1, pp. 145-152).

Sankey, T. T., McVay, J., Swetnam, T. L., McClaran, M. P., Heilman, P., & Nichols, M. (2018). UAV hyperspectral and lidar data and their fusion for arid and semi-arid land vegetation monitoring. Remote Sensing in Ecology and Conservation, 4(1), 20-33.

Schuster, B. G. (1970). Detection of tropospheric and stratospheric aerosol layers by optical radar (lidar). *Journal of Geophysical Research*, *75*(15), 3123-3132.

Shackleton, J., VanVoorst, B., & Hesch, J. (2010, August). Tracking people with a 360-degree lidar. In *2010 7th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance* (pp. 420-426). IEEE.

Shan, J., & Toth, C. K. (2018). *Topographic laser ranging and scanning: principles and processing*. CRC press.

Shih, K. T., Balachandran, A., Nagarajan, K., Holland, B., Slatton, K. C., & George, A. D. (2008, July). Fast Real-Time LIDAR Processing on FPGAs. In *ERSA* (pp. 231-237).

Smistad, E., Falch, T. L., Bozorgi, M., Elster, A. C., & Lindseth, F. (2015). Medical image segmentation on GPUs–A comprehensive review. *Medical image analysis*, *20*(1), 1-18.

Teza, G., Galgaro, A., Zaltron, N., & Genevois, R. (2007). Terrestrial laser scanner to detect landslide displacement fields: a new approach. *International Journal of Remote Sensing*, *28*(16), 3425-3446.

TU-editor. (2018). Velodyne Slashes Lidar Sensor Price in Half. Consulté sur https://www.tu-auto.com/velodyne-slashes-lidar-sensor-price-in-half/

Vashum, K. T., & Jayakumar, S. (2012). Methods to estimate above-ground biomass and carbon stock in natural forests-a review. *J. Ecosyst. Ecogr*, *2*(4), 1-7.

Velodyne. (2018). Velodyne LiDAR PUCK™ datasheet. Consulté sur http://www.mapix.com/wp-content/uploads/2018/07/63-9229_Rev-H_Puck-_Datasheet_Web-1.pdf

Wang, C. K., & Tseng, Y. H. (2010). *DEM generation from airborne LiDAR data by an adaptive dual-directional slope filter*. na.

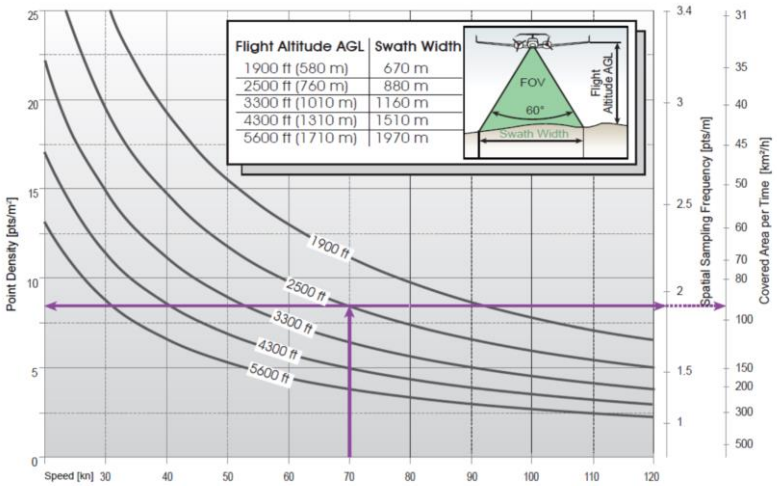
Wang, Z., Liu, Y., Liao, Q., Ye, H., Liu, M., & Wang, L. (2018, July). Characterization of a RS-LiDAR for 3D Perception. In *2018 IEEE 8th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)* (pp. 564-569). IEEE.

Yin, W., He, W., Gu, G., & Chen, Q. (2014). Approach for LIDAR signals with multiple returns. *Applied optics*, *53*(30), 6963-6969.

Zimbelman, E. G., & Keefe, R. F. (2018). Real-time positioning in logging: Effects of forest stand characteristics, topography, and line-of-sight obstructions on GNSS-RF transponder accuracy and radio signal propagation. PloS one, 13(1), e0191017.

8. Annexes

Annexe 1



Annexe 1 : exemple de planification de levé par lidar aéroporté avec différentes vitesses et altitudes de vol pour le système Riegl VQ780i

Annexe 2

	Specifications:
Sensor:	• 16 Channels • Measurement Range: 100 m • Range Accuracy: Up to ±3 cm (Typical)[1] • Field of View (Vertical): +15.0° to -15.0° (30°) • Angular Resolution (Vertical): 2.0° • Field of View (Horizontal): 360° • Angular Resolution (Horizontal/Azimuth): 0.1° – 0.4° • Rotation Rate: 5 Hz – 20 Hz • Integrated Web Server for Easy Monitoring and Configuration
Laser:	• Laser Product Classification: Class 1 Eye-safe per IEC 60825-1:2007 & 2014 • Wavelength: 903 nm
Mechanical/ Electrical/ Operational	• Power Consumption: 8 W (Typical)[2] • Operating Voltage: 9 V – 18 V (with Interface Box and Regulated Power Supply) • Weight: ~830 g (without Cabling and Interface Box) • Dimensions: See diagram on previous page • Environmental Protection: IP67 • Operating Temperature: -10°C to +60°C[3] • Storage Temperature: -40°C to +105°C
Output:	• 3D LiDAR Data Points Generated: - Single Return Mode: ~300,000 points per second - Dual Return Mode: ~600,000 points per second • 100 Mbps Ethernet Connection • UDP Packets Contain: - Time of Flight Distance Measurement - Calibrated Reflectivity Measurement - Rotation Angles - Synchronized Time Stamps (µs resolution) • GPS: $GPRMC and $GPGGA NMEA Sentences from GPS Receiver (GPS not included)

63-9229 Rev-H

Annexe 2 : Fiche technique du Velodyne VLP-16

Annexe 3

Géopolis couleur :

https://vimeo.com/346864595

Assemblage mines de Baulmes scans 1 et 2 :

https://vimeo.com/344063864

Assemblage mines de Baulmes scans 3,4,5 et 6 en couleur :

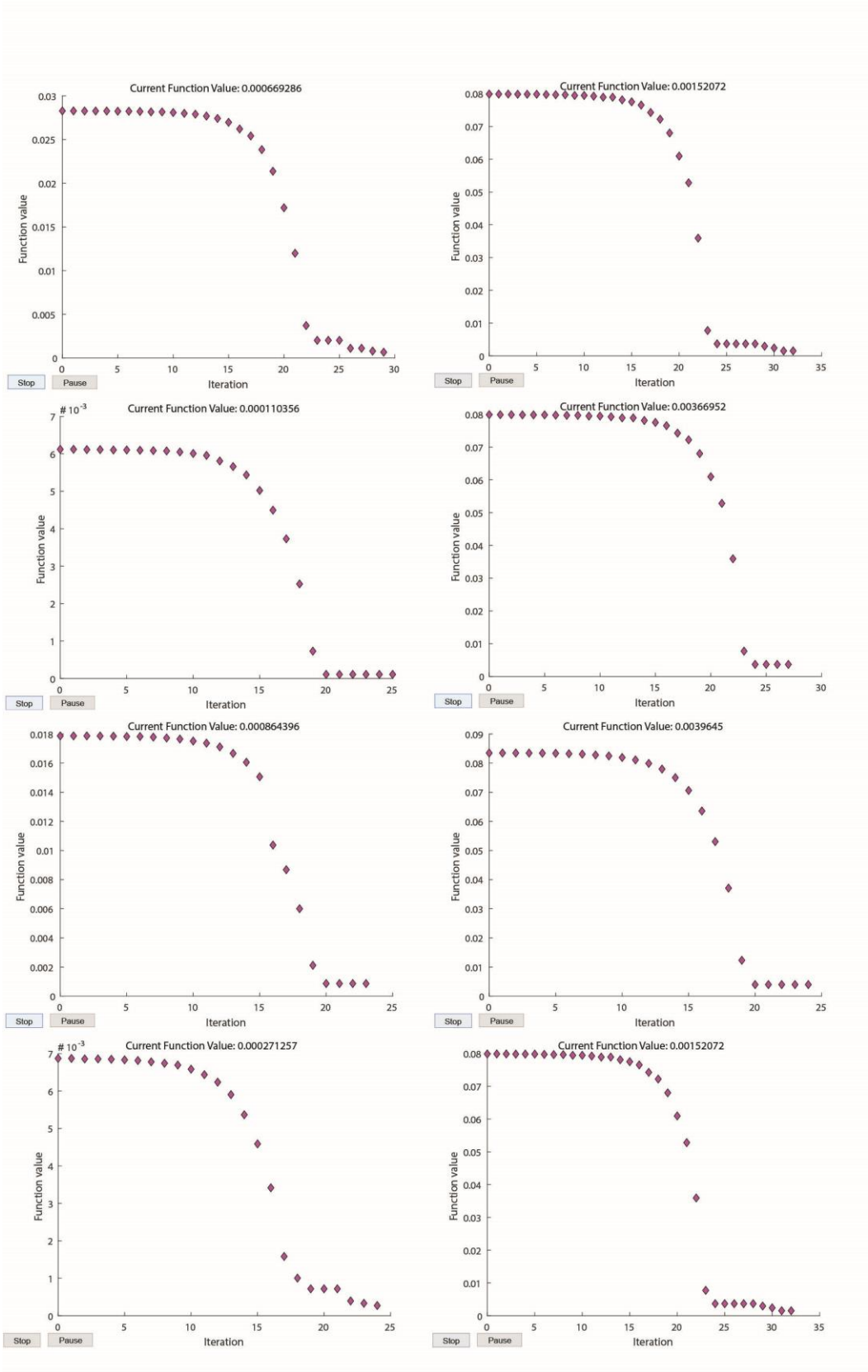
https://vimeo.com/345244511

Assemblage mines de Baulmes scans 3,4,5 et 6 :

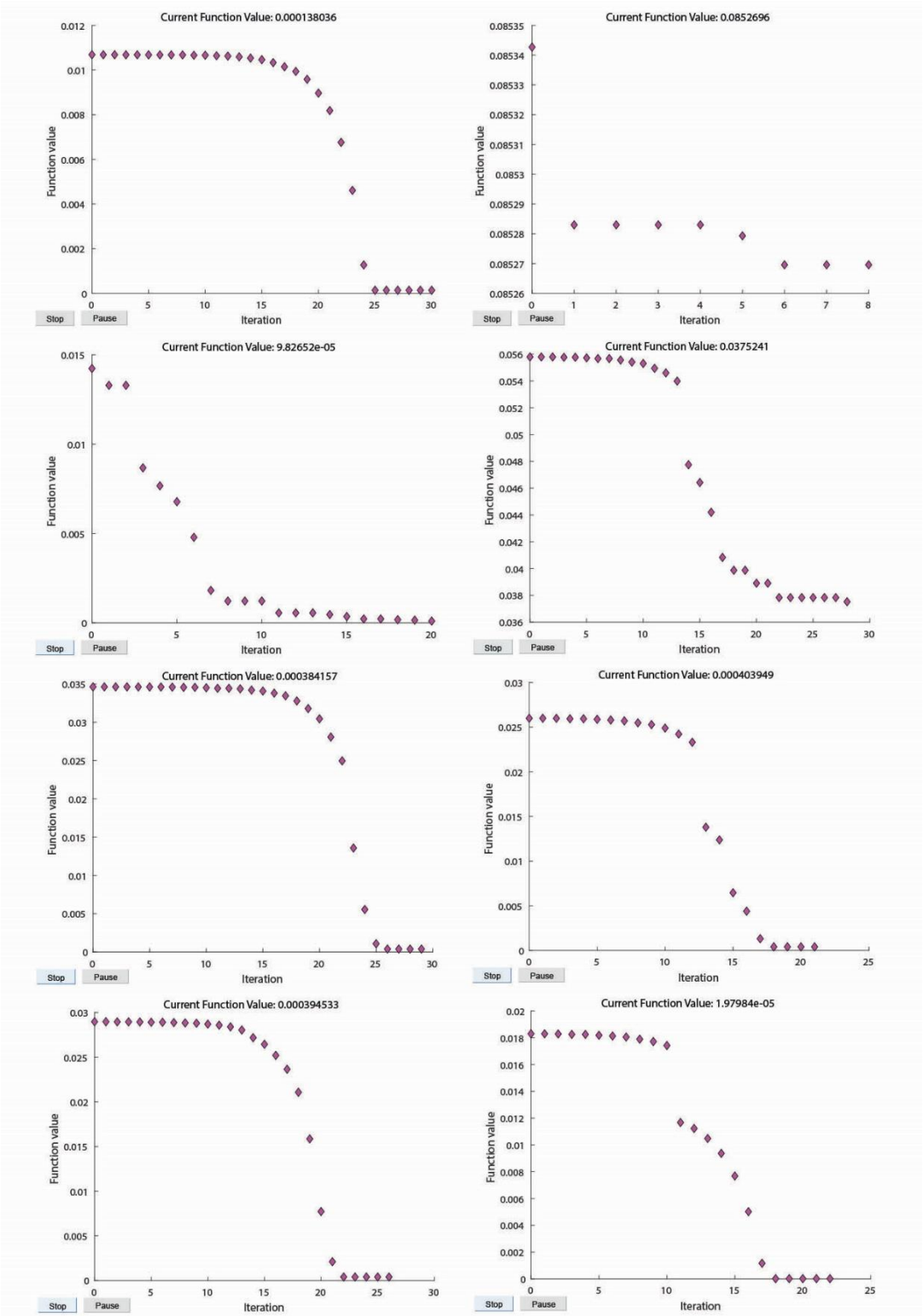
https://vimeo.com/345031167

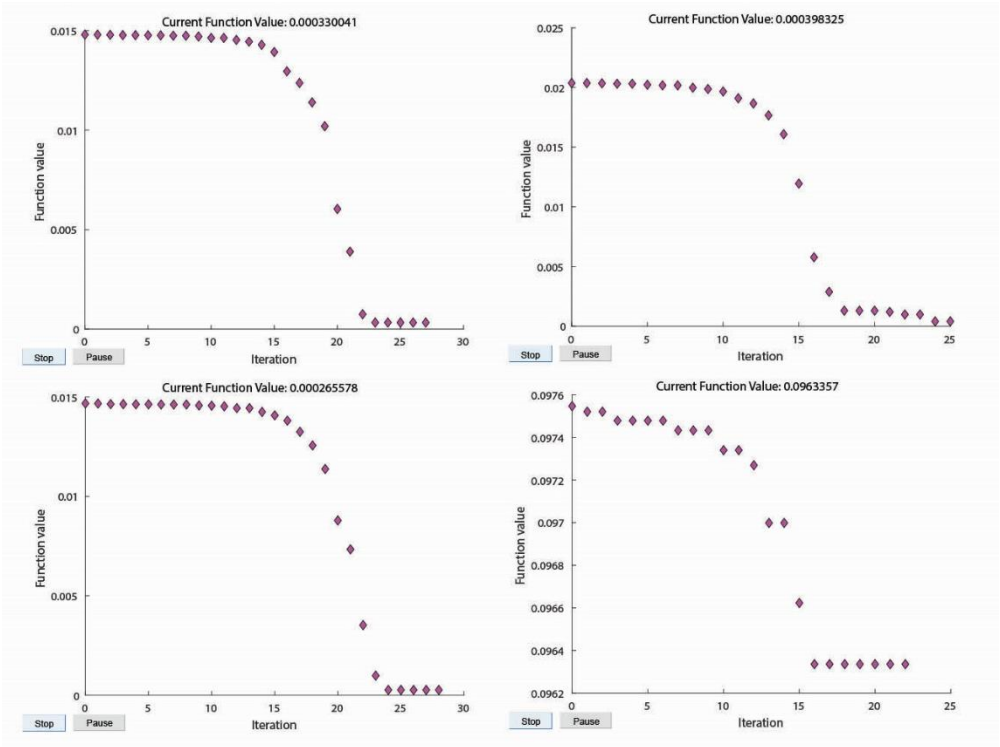
Annexe 3 : QR codes et liens permettant d'accéder aux vidéos d'animations

Annexe 4

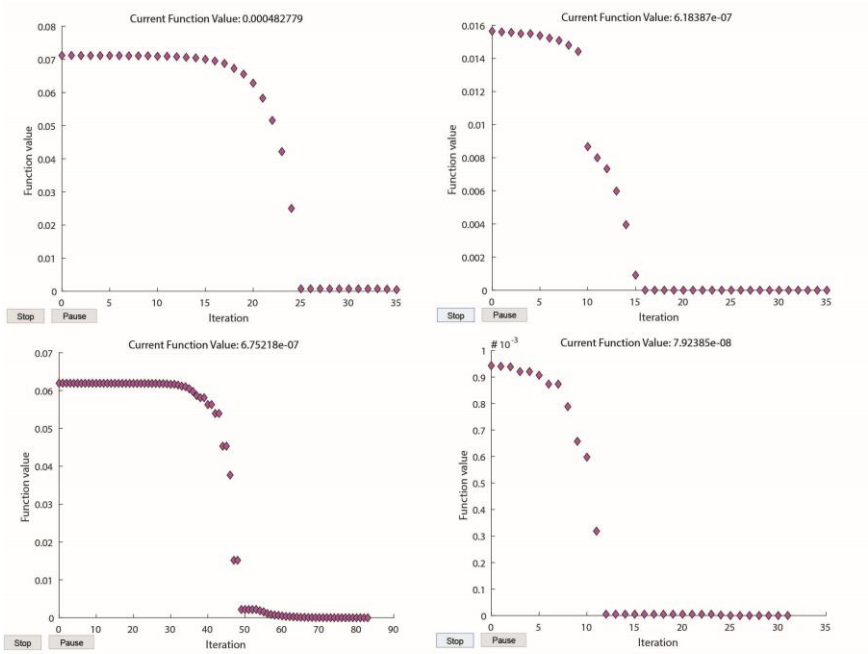


Annexe 4 A : Résultats de l'optimisation des paramètres α1 (colonne de gauche) et α1 (colonne de droite) pour les scans du Géopolis 1 à 4 (dans l'ordre).


Current Function Value: 0.000138036
Current Function Value: 0.0852696
Current Function Value: 9.82652e-05
Current Function Value: 0.0375241
Current Function Value: 0.000384157
Current Function Value: 0.000403949
Current Function Value: 0.000394533
Current Function Value: 1.97984e-05
Function value
Iteration
Stop
Pause

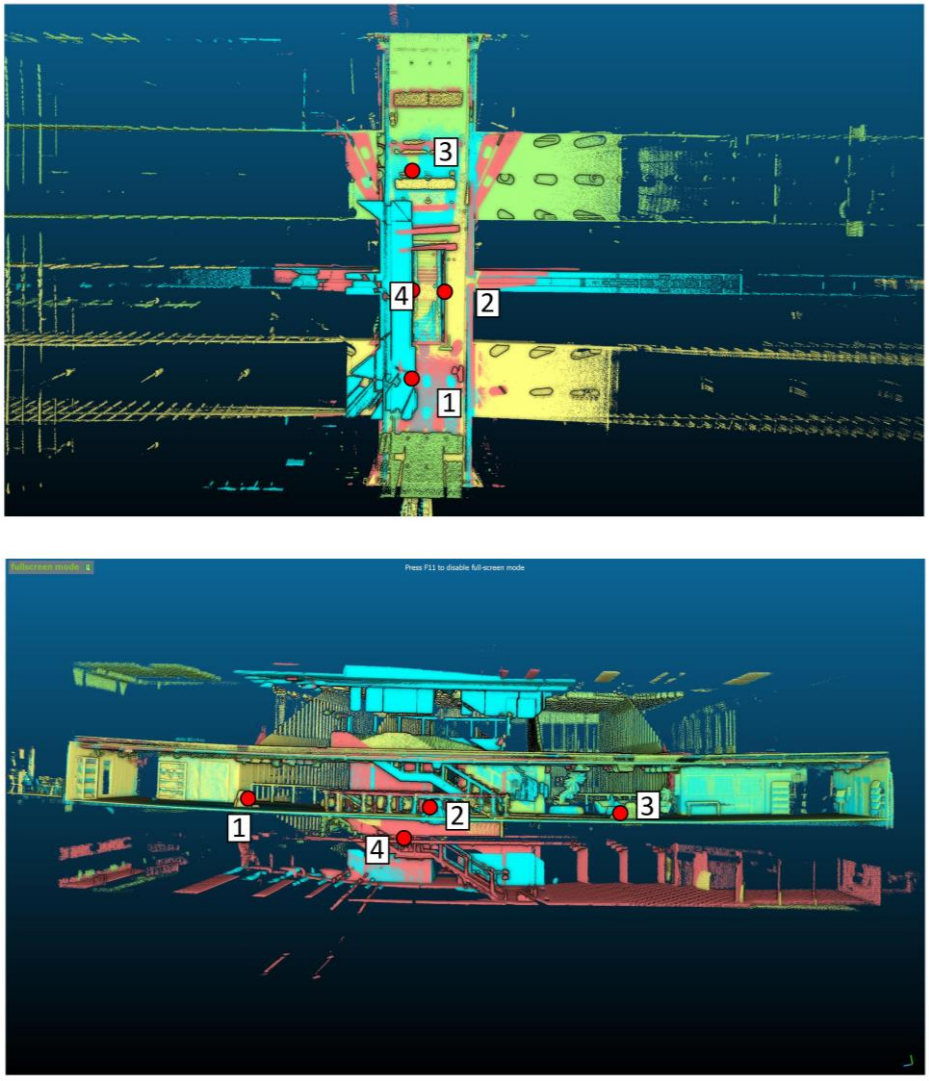


Annexe 4 B : Résultats de l'optimisation des paramètres α1 (colonne de gauche) et α2 (colonne de droite) pour les scans 1 à 6 des mines de Baulmes (dans l'ordre).



Annexe 4 C : Résultats de l'optimisation des paramètres α1 (colonne de gauche) et α2 (colonne de droite) pour les scans 1 et 2 en forêt (dans l'ordre).

Annexe 5



Annexe 5 : Représentation de l'assemblage effectué dans le Géopolis (depuis le haut et de face). Chaque couleur est associée à un des 4 emplacements de scan.

Annexe 6

6A : Assemblage Géopolis

$$T_{Scan1} = \begin{bmatrix} 0.990428984165 & 0.057955641299 & 0.125270664692 & 4.184892654419 \\ -0.084393486381 & 0.972441136837 & 0.217346072197 & 11.367704391479 \\ -0.109221786261 & -0.225837469101 & 0.968023061752 & 34.658134460449 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{Scan2} = \begin{bmatrix} -0.536881685257 & 0.075802773237 & -0.840246140957 & 4.640628814697 \\ -0.142084598541 & 0.973606109619 & -0.178619816899 & 8.970621109009 \\ -0.831607997417 & -0.21528357267 & -0.511940479279 & 24.863578796387 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{Scan3} = \begin{bmatrix} -0.897223055363 & 0.066064603627 & -0.436608672142 & 0.704137325287 \\ 0.151478543878 & 0.974796712399 & -0.163785606623 & 7.424655437469 \\ 0.414784789085 & -0.21308910846 & -0.884616255760 & 16.462184906006 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{Scan4} = \begin{bmatrix} 0.997671127319 & 0.019428068772 & 0.065393634140 & 0.916549801826 \\ -0.025732278824 & 0.994953036308 & 0.096986457705 & 3.587328569794 \\ -0.063179351389 & -0.098443292081 & 0.993134498596 & -0.805100262165 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

6B : Assemblabe de « Mines 1 » et « Mines 2 »

$$T_{Mine1} = \begin{bmatrix} 1.000000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.000000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.000000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.000000 \end{bmatrix}$$

$$T_{Mine2} = \begin{bmatrix} 0.744161665440 & -0.041778504848 & 0.666692197323 & 8.936515808105 \\ -0.050254311413 & 0.991712391376 & 0.118240326643 & -5.705412864685 \\ -0.666106522083 & -0.666106522083 & 0.735894322395 & 14.224426269531 \\ 0 & 0 & 0 & 1.000000 \end{bmatrix}$$

6C : Alignement de « Mine 3 » à « Mines 6 »

$$T_{Mine3} = \begin{bmatrix} 0.966533362865 & 0.178327396512 & 0.184425175190 & -38.27271270752 \\ -0.18079796433 & 0.983514130116 & -0.003471477889 & 5.066590785980 \\ -0.18200388550 & -0.029988344759 & -0.982840716839 & -61.39165115356 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{Mine4} = \begin{bmatrix} 0.797760367393 & 0.160615041852 & -0.581191003323 & -28.162662506104 \\ -0.11491864174 & 0.986704111099 & 0.114939719439 & 2.582850456238 \\ 0.591923952103 & -0.02490484714 & 0.805610060692 & -50.537784576416 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{Mine5} = \begin{bmatrix} 0.830287873745 & 0.150568097830 & -0.536610722542 & -16.514669418335 \\ -0.08801655471 & 0.986158013344 & 0.140520483255 & 2.790734052658 \\ 0.550340950489 & -0.0694418475 & 0.832047581673 & -38.499790191650 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{Mine6} = \begin{bmatrix} 0.976046085358 & 0.165548145771 & -0.141168147326 & -6.408856391907 \\ -0.15981325507 & -0.985822737217 & 0.051118347794 & 2.688565731049 \\ 0.147629365325 & -0.027333287522 & 0.988664746284 & -35.24146270752 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

6D : Matrice de transformation pour les scans en forêt

$$T_{Forêt1} = \begin{bmatrix} 1.000000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.000000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.000000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.000000 \end{bmatrix}$$

$$T_{Forêt2} = \begin{bmatrix} 0.975323557854 & 00.083567209542 & -0.204356238246 & 9.3074712753300 \\ -0.075808316469 & 0.996082365513 & 0.045519933105 & 0.0909260362390 \\ 0.207360237837 & -0.028904899955 & 0.977838039398 & 5.826176166534 \\ 0 & 0 & 0 & 1.000000 \end{bmatrix}$$

Annexe 7

	Correctif α1	**Correctif α2**
Scan 1	1.057	0.079
Scan 2	-0.631	0.347
Scan 3	-0.351	0.296
Scan 4	-1.061	-1.087

Instructions pour l'utilisation des codes

Pour utiliser les codes de ce mémoire, un fichier .pcap de test créé dans les mines de Baulmes est mis à disposition. Il s'agit du fichier créé par le lidar à 360 degrés et d'une durée de scan de 180 secondes.

1) Code principal

Pour lancer le code, il est nécessaire de spécifier le répertoire du fichier .pcap présent dans le dossier /scan_demo.

Par exemple : `input = 'C:\Users\Code Matlab\scan_demo';`

Les autres paramètres permettant faire tourner le code ont déjà été initialisés et concerne la vitesse de rotation, la synchronisation du moteur, la calibration du bras et des paramètres alpha1 et alpha2.

Le code est paramétré pour extraire chacune des 16 bandes de scans séparément au format .PLY dans le dossier « result ».

2) Calibration (dossier Fminsearch)

Ce code permet la définition des paramètres alpha 1 et alpha 2 afin de calibrer le système lidar. Pour utiliser ce code, il est nécessaire de spécifier le répertoire du fichier .pcap des mines de Baulmes comme procédé pour le code principal, mais **également** dans les fonctions « cali_bande » et « cali_doming »

(i) La calibration de alpha1 est faite grâce à la fonction « cali_bande » présente dans le dossier /fminsearch. Le paramètre alpha 1 correspond au premier argument de la variable de sortie x.

(ii) La calibration de alpha2 est faite grâce à la fonction « cali_doming » présente dans le dossier /fminsearch. Le paramètre alpha 2 correspond au deuxième argument de la variable de sortie x.

3) Fit_plane

Ce code permet de déterminer les distances d'un nuage de points à un plan théorique défini à partir d'une partie de l'ensemble de points. Pour tester le code, une partie du couloir central du Géopolis « fit_demo » a été extrait au format .PLY est mise à disposition.

Divers paramètres sont à disposition dans le code est permettent entre autre de régler la résolution du scan et l'intervalle de distance pour lequel le plan théorique est généré.

4) Synchronisation

Ce code permet de détermine le moment où le moteur commence à tourner afin d'ensuite synchroniser le lidar en post-traitement.

Comme pour les autres codes, il est important de déterminer l'emplacement du scan à traiter dans la valeur « input ».

Annexe 8 : Code principal

- Travail de Master Jason Bula : Velodyne VLP16
- répertoire des scans bruts
- Initialisation des paramètres propre à la prise de mesures
- Paramètres modifiables
- Correction du nuage de points à appliquer lors de la rotation
- Transformation de chaque image
- Le code qui suit permet de regrouper toutes les images en 1 seul nuage
- Enregistrement de l'ensemble de nuage de point
- Post-traitement du nuage de point
- Exportation du nuage de point

Travail de Master Jason Bula : Velodyne VLP16

```
clear, close all
```

répertoire des scans bruts

```
%gestion des répertoires



% Répertoire où sont stocké les fichiers .pcap

input = 'C:\Users\jason\Documents\Travail master\Rendu\Code Matlab';



% Répertoire ou le résultat est enregistré

output ='Code principal\result';

% Nom du fichier .pcap

input_file_name = 'baulmes_demo.pcap';

% Nom du fichier à enregistrer

output_file_name = 'baulmes_demo';
```

```
cd(input)
```

Initialisation des paramètres propre à la prise de mesures

ouverture d'un scan

```
veloReader = velodyneFileReader(input_file_name,'VLP16');



times = 1800; % Temps de l'aquisition

angle = 360; % Angle de rotation du LiDAR

first = 199; % Temps à la première image
```

Paramètres modifiables

Mettre à 0 pour une calibration ou à 1 pour sélectionner seulement les points positifs sur l'axe x

```
pos = 1;



% Il peut être utile d'enregistrer seulemement les bandes 1 et 16 pour

% montrer l'effet de la calibration. Si pos2 = 1, toutes les bandes sont

% enregistrées, si pos2 = 0, seuls les bandes 1 et 16 sont enregistrées

pos2 = 1;



%Il est possible de modifier la résolution du fichier de sortie. Si ce

%paramètres est = à 0, tous les points sont conservés

gridStep = 0;
```

```
last = first +times; % Temps à la dernières image



angle_deg=(0:angle/times:angle); % Angle de rotation après chaque image

angle = deg2rad(angle_deg); % transformation en radian



% Angles de correcion alpha 1 et alpha 2. Fixé à 0 en l'absence de

% calibration

alpha_ini= [-0.741886291503907    0.000277221679687500];



% Il s'agit de des angles correctifs entre la verticale dans le

% référentiel du LiDAR et la verticale réelle



alpha_1 = alpha_ini(1);

alpha_2 = alpha_ini(2);



% Il s'agit de la longueur du bras équivalent à la distance entre le centre

% optique du LiDAR et le centre de rotation.

R = 0.0945;









% optionnel, en cas de disfonctionnement du moteur (initial = 0)

theta3 = 0;
```

Correction du nuage de points à appliquer lors de la rotation

```
% Dans cette partie du code, le scan va être extrait image après image afin

% d'appliquer la correction nécessaire pour réaligner le nuage de points.

% Tout d'abords, seuls les images contenant des coordonnées positives sur X

% vont être conservées, ensuite chaque image va être traitée séparément.

% Deux matrices de transformation seront appliquées à chaque image. Une

% contenant la rotation selon l'angle du LiDAR (varie au fil du temps) et

% l'autre, une translation appliquée correspondant au la distance entre le

% bras et le centre optique du LiDAR. Cette distance à été mesurée

% manuellement et correspond à un déplacement sur z de R = 0.093m (peut

% être amélioré). Enfin, chaque image est enregistrée séparément dans un

% Cell.



s = 0;

for i = 2 : length(angle) % le code tourne autant de fois qu'il y a d'images

    NF = first + s;

     ptCloudIn = readFrame(veloReader,NF); % Sélection des images séparément



% sélectionne ou non le total des points du scan

if pos == 1

     ptCloudIn3 =  ptCloudIn.Location(1,:,1);

     ptCloudIn2 = ptCloudIn3(ptCloudIn3 >=0); % Sélection des points positifs
```

```
    % Remplacement des dans le nuage de points de base

    ptCloudIn =  pointCloud(ptCloudIn.Location(:,1:length(ptCloudIn2),:));

end



clear ptCloudIn2 ptCloudIn3
```

Transformation de chaque image

Définition des matrices de transformation Les matrices A1 et A2 correspondent permettent d'adapter la verticale (paramètres alpha 1 et alpha2)

```
% Correction de l'alignement en fonction de la vitesse du moteur

VM = [cos(angle(i)) 0 sin(angle(i)) 0; 0 1 0 0; -sin( angle(i)) 0 ...

      cos(angle(i)) 0; 0 0 0 1];



A1 = [1 0 0 0; 0 cosd(alpha_1) sind(alpha_1) 0 ; ...

      0 -sind(alpha_1) cosd(alpha_1) 0 ; 0 0 0 1];



A2 =  [cosd(alpha_2) sind(alpha_2) 0 0; ...

     -sind(alpha_2) cosd(alpha_2) 0 0; 0 0 1 0; 0 0 0 1];

% La matrice T correspond à la matrice qui permet une translation de chacun

% des points afin d'enlever la longueur du bras (paramètre R)

T = [1 0 0 0; 0 1 0 0; 0 0 1 0; 0 0 R 1];

% Ajustement de la vitesse du moteur
```

```
T4 = [cosd(theta3) sind(theta3) 0 0; ...

     -sind(theta3) cosd(theta3) 0 0; 0 0 1 0; 0 0 0 1];



% Application des transformations aux nuages de points

tform_T = affine3d(T);

ptCloudIn = pctransform(ptCloudIn,tform_T);



tform_A1 = affine3d(A1);

ptCloudIn = pctransform(ptCloudIn,tform_A1);



tform_A2 = affine3d(A2);

ptCloudIn = pctransform(ptCloudIn,tform_A2);



tform_T = affine3d(T4);

curr_img = pctransform(ptCloudIn,tform_T); %configuration 2



tform_R = affine3d(VM);

Nuage{i-1} = pctransform(curr_img,tform_R); % enregistrement dans un cel



s = s + 1; % possible de changer

end

%disp('Transformations done') % première étape terminée
```

```
% Le code qui suit permet d'extraire chacun des nuages de points enregistré

% Les différentes boucles présentes dans le codes permettent d'accélerer le

% procéessus d'enregistrement des nuages de points. Les 16 bandes peuvent être

% enregistrées séparéments ou toutes ensembles. Une fois tous les nuages de

% points extrait, un assemblage est effecté



% Enregistrement de toutes les bandes ou seulement de la bande 1 et 16

if pos2 == 1

    bandNumber = 16;

else

    bandNumber = 2;

end
```

Le code qui suit permet de regrouper toutes les images en 1 seul nuage

```
%de point. Les bandes sont enregistrées séparararémenent mais peuvent être à

%fusionnées après coup.



for bande_sep = 1 : bandNumber

if pos2 == 1

    iiii=bande_sep;

else
```

```
    Bande_calibration = [1 16];

    iiii = Bande_calibration(bande_sep);

end



% Initialisation des variables

x = [];

y = [];

z = [];



X_ref = [];

Y_ref = [];

Z_ref = [];



X_ref_final = [];

Y_ref_final = [];

Z_ref_final = [];



% Accélération du processus en combinant plusieurs boucles

for iii = 1 : 10

    for ii = (times/10*iii)-((times/10)-1) : iii*times/10

     for i = iiii:iiii % enregistrement des bandes séparéments
```

```
% Suppression des anciennes valeurs

        x1 = [];

        y1 = [];

        z1 = [];



% Sélection des points dans les bon emplacement des matrice

% Les nuages de points sont enregistrés sous la forme suivante : 16*1800*3

% 16 correspond à la bande, 1800 correspond au nombre de points enregistrés

% par bande, 3 correspond aux valeurs x y et z.



x1(i,:) = Nuage{1,ii}.Location(i,:,1);

y1(i,:) = Nuage{1,ii}.Location(i,:,2);

z1(i,:) = Nuage{1,ii}.Location(i,:,3);



x = [x x1(i,:)];

y = [y y1(i,:)];

z = [z z1(i,:)];



    end

    X_ref = [X_ref x];

    Y_ref = [Y_ref y];

    Z_ref = [Z_ref z];
```

```
    x = 0;

    y = 0;

    z = 0;

    end


    X_ref_final = [X_ref_final X_ref];

    Y_ref_final = [Y_ref_final Y_ref];

    Z_ref_final = [Z_ref_final Z_ref];


 disp(iii) % Compteur de progression de l'extraction

    X_ref = 0;

    Y_ref = 0;

    Z_ref = 0;

end


% disp('Extraction done')
```

Enregistrement de l'ensemble de nuage de point

```
ref = [X_ref_final; Y_ref_final; Z_ref_final]';

PC_corr1 = pointCloud(ref);
```

Post-traitement du nuage de point

Les lignes suivantes permettent d'effectuer un traitement du nuages de points.

```
% Tout d'abord, le bruit va 'etre retiré avec la fonction
```

```
% 'denoise'. Cette fonction étant assez longue peut être désctivées si le

% résultat doit être affiché rapidement.

% Le retrait du bruit a finalement été effectué sur CloudCompare qui a

% permis d'obtenir de meilleurs résultats



%PC_corr1 = pcdenoise(PC_corr1);

% disp('denoise done')

% Ensuite, le nuage de point va être réduit à la résolution souhaitée. En

% effet, les zones se trouvant très proches du LiDAR comporteront une

% grande résolution tandis que les zones éloignées du LiDAR auront une

% résolution réduite. C'est pourquoi un ajustement de la résolution va

% permettre une réduction de la quantité de données sans impacter sur la

% qualité (selon la résolution).



if gridStep == 0

    PC_downsampled_1 = PC_corr1;

else

    PC_downsampled_1 = pcdownsample(PC_corr1,'gridAverage',gridStep);

end



%disp('downsampled done')
```

```
% Cette partie du code permet de retirer les points ne comportant pas de

% données

[PC_Final1,indices]= removeInvalidPoints(PC_downsampled_1);

%disp('removeInvalidPoints done')
```

Exportation du nuage de point

Dans cette partie du code, le nuage de point est exporté

```
% Définition des noms des documents en sortie

Nom_fichier = sprintf([output_file_name num2str(iiii)]);



%accès au répertoire de sortie

cd(output)

pcwrite(PC_Final1,Nom_fichier,'PLYFormat','binary');



% retour dans le repertoire des fichier captures

cd(input)

ref = []; % suppression du nuage de point chargé

end

disp('Terminé')
```

Published with MATLAB® R2018a

Annexe 9 : Evaluation de l'erreur par rapport au plan théorique

Contents

- Evaluation des erreur par rapport à un plan théorique
- Paramètrage du plan
- répertoire où se trouve la fonction affine_fit
- distance au plan
- Affichage des 3 figures

Evaluation des erreur par rapport à un plan théorique

```
clear, close all

% Après extraction d'un plan à partir d'un nuage de point, ce code va

% définir l'équation du plan, mesurer l'erreur en fonction de la distance à

% l'origine, et créer un histogramme des erreurs.

%cd 'C:\Users\jason\Google Drive\Unil\Master\Semestre 1\Signal process\Ex1\MATLAB
files EX1'

%load 'matlab.mat'

% Répertoire des fichiers entrants

input = cd;

cd(input)



% Ouverture d'un fichier contenant une surface

extract1 = pcread('fit_demo.ply'); % extraction de ses points



 gridStep = 0.005; %choix de la résolution pour l'affichage des points

 extract1 = pcdownsample(extract1,'gridAverage',gridStep);
```

```
% points de référence pour le plan

x = extract1.Location(:,1);

y = extract1.Location(:,2);

z = extract1.Location(:,3);



dist = (x.^2 + y.^2 + z.^2).^(1/2);
```

Paramètrage du plan

```
%Interval sur lequel les points sont considérés pour la création du plan [m]

Range = [3 7];



%choix de la résolution pour la création du plan

gridStepplan = 0.2;



%Sous-échantillonage des points appartenant au plan

extract2 = pcdownsample(extract1,'gridAverage',gridStepplan);



xplan = extract2.Location(:,1);

yplan = extract2.Location(:,2);

zplan = extract2.Location(:,3);



%sélection des points dans la plage de portée

A = (dist>Range(1) & dist<Range(2));
```

```
xplan = nonzeros(A.*x);

yplan = nonzeros(A.*y);

zplan = nonzeros(A.*z);



  A2 = (dist>1 & dist<100); %sélection des points

 %

  x = nonzeros(A2.*x);

  y = nonzeros(A2.*y);

  z = nonzeros(A2.*z);

  dist = (x.^2 + y.^2 + z.^2).^(1/2);
```

répertoire où se trouve la fonction affine_fit

Affine_fit : https://ch.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/43305-plane-fit

```
[n_1,~,p_1] = affine_fit([xplan yplan zplan]);









% Bornes du plan

xx = (min(x):max(x))';

xx=xx.*ones(length(xx));

yy_1 = ((min(y):(max(y)-min(y))/length(xx*2):max(y)));

yy = ((yy_1(1:end-1)+(yy_1(2:end)))/2).*ones(length(xx*2));
```

```
% Calcul du z correspondand

d = -p_1*n_1; % Paramètre d de l'équation du plan

z_norm = (-n_1(1)*xx - n_1(2)*yy - d)/n_1(3);
```

distance au plan

```
a = n_1(1);

b = n_1(2);

c = n_1(3);



dist_xyz = [dist x y z];



[~,idx] = sort(dist_xyz(:,1)); % Triage de la première colonne

dist_sort = dist_xyz(idx,:);





error = (a*dist_sort(:,2)+b*dist_sort(:,3)+c*dist_sort(:,4)+d)/sqrt(a^2+b^2+c^2);
```

Affichage des 3 figures

```
figure(1)

surf(xx,yy,z_norm)

hold on

scatter3(x,y,z,1,'k')

xlabel('x');

ylabel('y');
```

```
zlabel('z');

dim = [0.2 0.5 0.3 0.3];

annot1 = {['Equation du plan : ' num2str(round(a,3)) 'x +'...

num2str(round(b,3)) 'y +'  num2str(round(c,3)) 'z =' num2str(round(d,3)) ]};

annotation('textbox',dim,'String',annot1,'FitBoxToText','on');

title('Plan correspondant aux points mesurés')

hold off



figure(2)

dc = linspace(1,10,length(dist));



xscat = sort(dist);

yscat = error;

regression = x\y;



yCalc1 = regression*x;

scatter(xscat,yscat,'.','k'); hold on





xlabel('distance [m]')

ylabel('erreur [m]')

title('Evolution de l''erreur en fonction de la distance');
```

```
n = length(dist); % nombre de point

std = std(error); % écart-type de l'erreur

std_moy = mean(abs(error));

figure(3)

histogram(error,'FaceColor','k')

title('Histogramme des erreurs');

xlabel('erreur en [m]')

ylabel('fréquence')

dim = [0.2 0.5 0.3 0.3];

str = {['Nombre de points : ' num2str(n)],['écart-type = ' num2str(round(std,3))],
...

    ['écart absolut moyen = ' num2str(round(std_moy,3))]};

annotation('textbox',dim,'String',str,'FitBoxToText','on');
```

Published with MATLAB® R2018a

Annexe 10 : Calibration du système

Contents

- Travail de Master Jason Bula : Velodyne VLP16 - Calibration
- répertoire des scans bruts

Travail de Master Jason Bula : Velodyne VLP16 - Calibration

```
clear, close all
```

répertoire des scans bruts

```
%gestion des répertoires

input = 'C:\Users\jason\Documents\Travail master\Rendu\Code Matlab';

output ='..\result';



input_file_name = 'baulmes_demo.pcap';

output_file_name = 'baulmes_demo';

first = 199; % Temps à la première image

times = 1800; % Temps de l'aquisition

angle = 360; % angle de rotation du LiDAR



 % = 1 pour une calibration des bandes, =0 pour calibration doming

calibration = 0;

cd(input)



% ouverture d'un scan

veloReader = velodyneFileReader(input_file_name,'VLP16');

theta0 = [0      0];
```

```
cd 'Fminsearch'\

if calibration == 1

options = optimset('Display','iter','PlotFcns',@optimplotfval);



% Paramètres initiaux

theta00 = [0 0];

fun = @cali_bande;



[x,fval,exitflag,output] = fminsearch(fun,theta00,options)

%cd(output)

else

R = 0.0945;



options = optimset('Display','iter','PlotFcns',@optimplotfval);

% Paramètres de base

theta00 = [0 0];

fun = @cali_doming;



[x,fval,exitflag,output] = fminsearch(fun,theta00,options)

end
```

Annexe 11 : Synchronisation du moteur et du lidar

Contents

- limite des images
- angle en fonction de l'image :
- Extraction des données xyz pour tous les nuages de points modifiés
- Évaluation des mouvemement des points
- lissage


```
clear
```

limite des images

```
input = 'C:\Users\jason\Documents\Travail master\Rendu\Code Matlab';



input_file_name = 'baulmes_demo.pcap';

output_file_name = 'baulmes_demo';

time = 1800; % Temps de l'aquisition

angle = 360; % angle de rotation du LiDAR

max_time = 260; % temps estimé avant le démarrage du moteur
```

angle en fonction de l'image :

```
angle_deg=(0:angle/time:angle);

angle = deg2rad(angle_deg);



cd(input)

veloReader = velodyneFileReader(input_file_name,'VLP16');

for i = 2 : max_time

    ptCloudIn = readFrame(veloReader,i);
```

```
      Nuage{i-1} = ptCloudIn; %configuration 2



end
```

Extraction des données xyz pour tous les nuages de points modifiés

initialisation des variables

```
x = [];

y = [];

z = [];



X_ref = [];

Y_ref = [];

Z_ref = [];



X_ref_final = [];

Y_ref_final = [];

Z_ref_final = [];





%for iii = 1 : 10

    for ii = 1 : max_time-1     %A modifier pour l'enregistrement des données

     for i = 1:16 %16 car le fichier est organisé en 16 bandes



        %suppression des anciennes valeurs
```

```
        x1 = [];

        y1 = [];

        z1 = [];

x1(i,:) = Nuage{1,ii}.Location(i,:,1);

y1(i,:) = Nuage{1,ii}.Location(i,:,2);

z1(i,:) = Nuage{1,ii}.Location(i,:,3);



x = [x x1(i,:)];

y = [y y1(i,:)];

z = [z z1(i,:)];

    end

    X_ref = [X_ref x];

    Y_ref = [Y_ref y];

    Z_ref = [Z_ref z];



    nuage2{ii} = [x ;y; z];

    lengthCloud(ii)=length(x);

    x = 0;

    y = 0;

    z = 0;

    end



disp('Extraction done')
```

```
Extraction done
```

Évaluation des mouvemement des points

```
A2= [];

for i = 1 : max_time-1



    if length(nuage2{1,i}) ~= length(nuage2{1,1})

    dimension = length(nuage2{1,i});

    dim = find(lengthCloud==dimension);

    A = nuage2{1,i}-nuage2{1,dim(1)};

    A1 = std(A,'omitnan');

    A2(i) = std(A1,'omitnan');

    else

A = nuage2{1,1}-nuage2{1,i};

A1 = std(A,'omitnan');

A2(i) = std(A1,'omitnan');

    end

end

figure(1)

plot(A2)

axis([0 length(A2) 0 max(A2)]);

title('Évolution du déplacemement des points')



xlabel('Nombre d''images');

ylabel('Amplitude (sans unité)');
```

lissage

```
A3 = smoothdata(A2);

x = 1:1:max_time;

for i = 1 : max_time

    if   A2(i) > 3*mean(A3(2:20),'omitnan')

        breakpoint = x(i);

        break

    end

end

x_1 = 1:breakpoint;

x_2 = breakpoint + 1:max_time;



y_1 = A2(1:end-(max_time-breakpoint-1));

y_2 = A2(breakpoint:end);

p1 = polyfit(x_1,y_1,1);

p2 = polyfit(x_2,y_2,1);

x_intersect = fzero(@(x) polyval(p1-p2,x),3);

              disp(['Le moteur démarre à l''image ' num2str(round(x_intersect,0))])
```

```
Le moteur démarre à l'image 198
```

Published with MATLAB® R2018a