le cnam
École supérieure des géomètres et topographes esgt

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS

ECOLE SUPERIEURE DES GEOMETRES ET TOPOGRAPHES

MÉMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le DIPLOME D'INGENIEUR CNAM

SPECIALITE : Géomètre et Topographe

par

Simon VANDERHAEGHE

Précision relative et niveau de détails, les limites d'utilisation du ZEB-Revo RT

Soutenu le 09 Septembre 2020

JURY

Monsieur Stéphane DURAND	Président du jury
Monsieur Sylvain CANTALOUBE	Maître de stage
Monsieur José CALI	Enseignant référent

Remerciements

Avant tout, je tiens à remercier l'ensemble du personnel de *Gexia* ; les dirigeants, M. Jean-Christophe Nadeau et M. Vincent Martinache, pour m'avoir permis de réaliser ce travail au sein de leur entreprise, M. Sylvain Cantaloube, maître de stage, pour m'avoir encadré lors de cette étude, sans oublier l'ensemble des collaborateurs, pour avoir contribué au bon déroulement de ce stage et partagé leurs connaissances et retours d'expériences.

Je remercie également M. José Cali, professeur référent, pour sa disponibilité et pour m'avoir fait part de ces observations tout au long de la construction de cette étude.

Enfin je remercie de manière plus large les intervenants extérieurs à l'entreprise ou l'école, pour avoir répondu à mes interrogations et m'avoir fourni des compléments d'informations, Mme Ivona Hubova de la société *GeoSLAM* ainsi que M. Tom Lowe du bureau de recherche *Data61*.

Liste des abréviations

2D : 2 Dimensions

3D : 3 Dimensions

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

CSIRO : Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization

EMQ : Écart Moyen Quadratique

GPS : Global Positioning System

ICP : Iterative Closest Point

Lidar : Light detection and ranging

M3C2 : Multiscale Model to Model Cloud Comparison

MEMS : MicroElectroMechanical Systems

NMAD : Normalized Median Absolute Deviation (anglicisme de déviation absolue normalisée à la médiane)

RMS : Root Mean Square (anglicisme de EMQ)

SLAM : Simultaneous Localization And Mapping

VEFA : Vente en État Futur d'Achèvement

PLC : Prioritize Laser Constraints (option du logiciel *GeoSLAM Hub*)

Glossaire

Amer : forme géométrique simple et facilement reconnaissable lors du calcul SLAM

Biais : estimation d'une erreur systématique (=composante de l'erreur de mesure qui varie de façon prévisible ou reste constante) [2]

Bruit : pour les mesures, perturbation du signal résultant en une épaisseur de trait

Centroïde : centre de gravité ou moyenne des positions des points d'un *cluster*

Cluster : groupe de points rassemblés en fonction de paramètres similaires

Consolidation : entre deux nuages de points, fait de les assembler de manière relative en utilisant des parties ou éléments distinctifs communs. Synonyme : recalage.

Densité spatiale : pour un nuage de points, nombres de points sur une surface donnée

Digitalisation : dans cette étude, fait de tracer des plans à partir d'un nuage de points

Échantillonnage : pour un nuage de points, fait d'augmenter (sur-échantillonnage) ou de diminuer (sous-échantillonnage) sa résolution ; pour un segment, fait de le découper en fonction d'un pas donné

EMQ : dans cette étude, résidu issu d'une consolidation entre deux nuages

Épaisseur de trait : largeur de trait importante formée par un ensemble de points

Géoréférencement : transformation des coordonnées des points dans un système de référence géodésique

Normale : à un plan ou une surface, correspond à la droite orthogonale à l'objet

Outlier : valeur aberrante au sein d'un groupe de valeurs

Quantile : valeur divisant une série de données en deux séries selon un pourcentage donné (ex : la valeur Q(0.6) divise une série telle que 60% de ses valeurs y sont inférieures)

Résolution : dans cette étude, plus petit espacement entre les points d'un nuage de points

Rugosité : indication de l'aspérité plus ou moins prononcée d'une surface

Scan : anglicisme désignant le relevé d'un objet par technologie 3D

Surfel : *cluster* affecté d'une ou plusieurs caractéristiques

Voxel : pixel 3D permettant la décomposition de l'espace en cubes

Table des matières

Remerciements 2
Liste des abréviations 3
Glossaire 4
Table des matières 5
Introduction 6
I DÉFINITIONS PRÉALABLES 8
I.1 EXACTITUDE, JUSTESSE ET FIDÉLITÉ DE MESURE 8
I.2 PRÉCISIONS ATTENDUES 9
II REVUE GÉNÉRALE DU ZEB-REVO RT 11
II.1 PRÉSENTATION DU SCANNER 11
II.1.1 Principes et composants 12
II.1.2 Algorithme SLAM 13
II.1.3 Logiciel GeoSLAM Hub 14
II.2 ÉTAT DE L'ART DES ÉTUDES EXISTANTES 15
II.2.1 D'un point de vue général 16
II.2.2 Au sein des cabinets de géomètres 17
III RÉPÉTABILITÉ DE MESURE ET ÉTUDE DE BRUIT ET RÉSOLUTION 20
III.1 CONDITIONS DE RÉPÉTABILITÉ 20
III.2 CALCULS ET ANALYSE DE RÉPÉTABILITÉ 20
III.2.1 Mode et paramètres de calcul 20
III.2.2 Analyse des résultats 22
III.3 LIMITATIONS DU BRUIT ET DE LA RÉSOLUTION 25
IV REPRODUCTIBILITÉ DE MESURE EN FONCTION DE LA MÉTHODOLOGIE 28
IV.1 TESTS ENTREPRIS 28
IV.1.1 Variations des paramètres de levé 29
IV.1.2 Variations des paramètres de traitement 30
IV.2 REPRODUCTIBILITÉ DE MESURE EN ENVIRONNEMENT RICHE 30
IV.3 REPRODUCTIBILITÉ DE MESURE EN ENVIRONNEMENT MOINS FAVORABLE 32
IV.3.1 Environnement de type VEFA 32
IV.3.2 Environnement de type hangar 33
IV.3.3 Environnement de type industriel 34
IV.4 ARTICULATION DU LEVÉ ENTRE LES ÉTAGES 37
V QUALITÉ DE LEVÉ 38
V.1 JUSTESSE DE MESURE 38
V.2 NIVEAU DE DÉTAILS 42
V.3 CONCLUSION(S) MÉTHODOLOGIQUE 45
VI MISE EN APPLICATION DE LA MÉTHODOLOGIE RETENUE 46
VI.1 A PETITE ÉCHELLE 46
VI.2 ARTICULATION DE LA GÉOMÉTRIE DE LEVÉ 50
Conclusion 53
Bibliographie 55
Table des annexes 59
Tables des illustrations 74

Introduction

Ce stage de fin d'études a été réalisé au sein de l'entreprise *Gexia*, plus précisément dans l'une des deux entités la composant, *Gexia Foncier Expert*. La société est un cabinet de géomètres experts, dirigé par Jean-Christophe Nadeau et Vincent Martinache. Elle est ainsi présente dans les domaines du foncier et de la topographie ainsi que de l'urbanisme et de la maîtrise d'œuvre, par le biais de *Gexia Foncier Expert*, mais réalise également des prestations dans le cadre de travaux publics et ferroviaires avec *Gexia Rail* (deuxième entité de l'entreprise). La société a un rayon d'action national, elle est implantée à Labège (région de Toulouse) mais dispose également de bureaux à Bordeaux, notamment pour *Gexia Foncier Expert*.

À l'image de nombreux autres cabinets de géomètres, l'entreprise est équipée de matériels topographiques permettant l'acquisition de données 3D, par le biais d'un scanner statique (*Trimble* TX5) mais également d'un scanner dynamique à main (*GeoSLAM* ZEB-Revo RT). Ces technologies, initialement statiques, ont ouvert de manière très large le champ des possibles pour les cabinets de géomètres et ont, de ce fait, réformé les procédures d'acquisition et de traitement des données ; phénomène accentué par l'apparition des scanners dynamiques, montés sur véhicule dans un premier temps puis personnellement transportables (à main ou sur sac à dos) de manière plus récente. Dans sa constante recherche de développement, l'entreprise *Gexia* cherche ainsi à développer l'utilisation qui est actuellement faite de ce matériel, et notamment du ZEB-Revo RT, afin d'en élargir les utilisations et de réformer, au besoin, les diverses procédures actuellement mises en place. Il est important de noter qu'à ce jour, mais aussi à court et moyen termes, *Gexia* utilise principalement les données acquises avec ces technologies 3D pour la réalisation de livrables 2D (plan, coupe etc.). La présente étude peut en revanche permettre à l'entreprise, à long terme, de réaliser des livrables 3D, tels que des maquettes de bâtiment, amenés à être de plus en plus importants et à constituer la norme dans les prochaines années.

Mon travail s'inscrit donc dans cette optique, et vise à étudier en détails le ZEB-Revo RT dans le but d'établir une méthodologie permettant d'obtenir une précision centimétrique. Dans la continuité des premières études faites par l'entreprise, par le biais du travail de fin d'études de Gabriel Bergé en 2019 [1], mais aussi en s'appuyant sur les retours d'expérience du personnel lors de précédentes missions, nous allons donc voir quels niveaux de précision relative et de détails peut-on raisonnablement obtenir d'un levé dynamique d'intérieur avec cet appareil.

Après la définition des notions et niveaux de qualité attendus, nous nous intéresserons donc au ZEB-Revo RT, d'un point de vue matériel et logiciel, mais aussi en termes de performances, à partir des données fournies par le constructeur et des études ayant été réalisées sur le scanner. Nous étudierons ensuite, sur la base d'une méthodologie initiale et au travers différents environnements, la répétabilité de mesure de l'appareil dans le but de fixer un seuil d'irreproductibilité et d'introduire, pour la suite de l'étude, des notions statistiques. Ces tests de répétabilité permettront également de fixer des valeurs de bruit et de résolution initiales. Suite à cela, des tests méthodologiques seront entrepris, au sein des mêmes environnements, afin de remarquer quels paramètres de levé et/ou de traitement permettent l'obtention de la meilleure précision relative et du meilleur niveau de détails pour former une nouvelle chaine d'acquisition et de traitement des données. Enfin, il conviendra de mettre cette dernière à l'épreuve, dans le cadre d'un levé final, présentant les caractéristiques d'un environnement de levé type pour l'entreprise, afin de quantifier réellement les bénéfices du travail effectué, sans oublier de nous pencher sur l'articulation de la méthodologie instaurée, pour assurer son emploi dans le cadre de travaux de plus grandes envergures.

I Définitions préalables

Dans le but de cadrer ce travail et de se débarrasser autant que possible des abus de langage, il est important de définir précisément les notions utilisées lors de cette étude.

I.1 Exactitude, justesse et fidélité de mesure

Le vocabulaire international de métrologie [2] introduit l'exactitude de mesure d'un appareil comme étant « l'étroitesse de l'accord entre une valeur mesurée et une valeur vraie »[1]. Cette notion d'exactitude est évaluée par le biais des concepts de justesse (« étroitesse de l'accord entre la moyenne d'un nombre infini de valeurs mesurées répétées et une valeur de référence »[1]) et de fidélité de mesure (« l'étroitesse de l'accord entre […] les valeurs mesurées obtenues par des mesurages répétés »[1]). Ce dernier concept, renvoyant lui-même aux idées de répétabilité (fidélité dans les mêmes conditions de mesurage, sur un même objet, pendant une période de temps courte), de fidélité intermédiaire (répétabilité des mesures sur une période de temps longue) et de reproductibilité de mesure (fidélité sur un même objet dans des conditions de mesurage changeantes). Il est important de noter que l'exactitude et la justesse de mesure ne sont pas des grandeurs quantifiables.

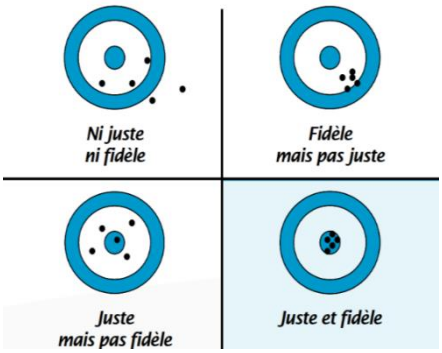


Figure 1 : Notions de justesse et de fidélité, source : DÉSENFANT M., De la mesure @ la métrologie

Pour évoquer les précisions de ces appareils, l'entreprise *GeoSLAM* [3] s'appuie sur les notions de *precision*, qualifiant la consistance des résultats répétés, et de *accuracy*, décrivant l'étroitesse d'une mesure par rapport à sa valeur réelle. Cette dernière est également divisée en deux principes, *relative accuracy* (étroitesse d'une mesure entre deux points, indépendamment de toute autre source d'erreur) et *absolute accuracy*, (qualité de localisation du levé dans le monde réelle, en termes de coordonnées).

Ainsi, en intégrant le fait que le concept de précision n'est pas employé dans le domaine de la métrologie française (il constitue simplement l'anglicisme de la fidélité), il est possible de poser les bases de cette étude.

[1] JCGM 2012, Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés

La précision relative du ZEB-Revo RT sera donc étudiée au travers des principes de répétabilité, de reproductibilité ainsi que de justesse de mesure. Il est important de remarquer que la fidélité intermédiaire des mesures ne sera pas abordée, car elle ne correspond pas à l'utilisation faite du scanner.

Avant de commencer cette étude, il reste nécessaire d'émettre quelques précisions supplémentaires. La notion de justesse, sera étudiée à une échelle globale (au travers l'ensemble du nuage ou du chantier s'il est composé de plusieurs nuages) mais aussi locale (au sein d'une même pièce ou sur des éléments caractéristiques). Aussi, et surtout pour le levé final, ces comparaisons se feront entre les nuages de manière directe mais également entre les livrables, ou portion de livrables, afin de rendre compte de la qualité de levé mais aussi de digitalisation. Il est enfin important de noter que le recours à un système de coordonnées, qu'il soit local ou issu d'un système de référence, par le biais d'un géoréférencement du nuage ou d'un recalage tel qu'une transformation Helmert, est considéré comme du ressort de l'étude de la précision absolue et donc non abordé dans les travaux présents.

La comparaison des nuages de points se fera donc par l'étude des statistiques à la suite d'une consolidation ICP portant sur l'ensemble de l'emprise du levé effectué. Cette dernière repose sur un algorithme itératif prenant en compte tous les points de la zone de recouvrement entre les deux nuages, et qui, sur le principe des moindres carrés, calcule les paramètres de transformation à appliquer à un nuage de sorte à minimiser les distances par rapport à un nuage de référence [4]. Ce choix permet ainsi de comparer de manière optimale les deux nuages de points en s'affranchissant d'autres erreurs supplémentaires. Aussi, le fait de prendre en compte la totalité du nuage permet d'étudier de manière globale l'imprécision du levé plutôt que de quantifier la dérive à partir d'une consolidation sur une partie restreinte du levé, faisant apparaitre des écarts maximum.

I.2 Précisions attendues

Au sein de *Gexia Foncier Expert*, comme dans de nombreuses autres entreprises, le ZEB-Revo RT est principalement utilisé pour des missions de foncier, ou ne requérant pas une précision centimétrique, et dans lesquelles les performances du scanner (partie II.1) sont optimales. Cependant, les missions à but architectural, requièrent une précision relative et un niveau de détails plus importants.

Il est ainsi utile de remarquer qu'il existe plusieurs types de rendus dans le cadre des travaux architecturaux (plans de sol, élévations ou encore coupes), ayant tous comme objectif de représenter différents éléments et caractéristiques d'un bâtiment [5]. La représentation graphique de ces différents rendus peut prendre la forme de livrables à différentes échelles (Tableau 1), bien que les plus courantes soient 1/100 et 1/50, conditionnant la précision et le niveau de détails requis. Le document d'*Historic England* [6], passant en revue l'ensemble des solutions 3D, nous apprend qu'une règle empirique veut que la résolution d'un nuage de points soit deux fois plus fine que le plus petit élément à identifier et que l'erreur de mesure (quantifiant l'exactitude et donc la précision relative) doit être à minima égale à cette résolution. Le plus petit élément à identifier (niveau de détails), correspondant au plus petit élément à représenter sur le report graphique (0.1 mm), défini en fonction de l'échelle du livrable, tout en sachant que le pouvoir séparateur de l'œil humain est de 0.0003 rad, et en définissant la lecture d'un plan à 30 cm de distance.

Échelle	Finalité	Niveau de détails	Erreur de mesure	Résolution du nuage
1/200	« Visualisation rapide des proportions, représentation simple avec lignes architecturales primaires »[2]	0,020 m	0,010 m	0,010 m
1/100	« Étude de stabilité, état sanitaire, visualisation plus précise des éléments architecturaux secondaires »[2]	0,010 m	0,005 m	0,005 m
1/50	« État sanitaire plus précis […], représentation complète des éléments architecturaux et altérations visibles»[2]	0,005 m	0,0025 m	0,0025 m
1/20 1/10	« Représentation détaillée de la sculpture, l'ornementation, la mouluration et les altérations »[2]	0,002 m 0,001 m	≤ 0,001 m	≤ 0,001 m

Tableau 1 : Précisions et niveaux de détails attendus en travaux architecturaux

[2] <http://www.artgp.fr/-releves-architecturaux-37-.html>, (consulté le 27/03/2020)

II Revue générale du ZEB-Revo RT

Dans la continuité de l'évolution des appareils de mesures 3D, les systèmes de cartographie portables à main, basé sur la technologie SLAM (*SLAM based handheld mapping system*), ont vu le jour et ont fait forte impression, notamment en raison de leur rapidité, de leur facilité d'utilisation mais aussi de leur coût attirant [7]. Ces technologies ont ouvert le champ des possibles au sein des levés 3D, grâce à leur portabilité mais aussi au fait qu'elles ne sont pas dépendantes de données de positionnement telles que la réception d'un signal GPS. Cela leur permet donc d'être polyvalentes et d'intervenir dans de nombreux environnements, où les systèmes de cartographie mobiles ne sont pas utilisables et où l'utilisation des scanners laser terrestres, n'est plus avantageuse car très chronophage [8].

II.1 Présentation du scanner

GeoSLAM est ainsi la première entreprise à avoir proposé à la vente un tel système de cartographie par le biais du ZEB1 en 2013. Ce produit est la version commerciale du ZEBedee, développé par le *CSIRO* et plus précisément sa branche *Data61,* spécialisée dans la « recherche et l'ingénierie en science des données »[3]. Suite à cela, de nombreuses améliorations ont ensuite vu le jour, tant au niveau des solutions matérielles qu'informatiques, avec le lancement du ZEB-Revo en 2015 puis du ZEB-Revo RT en 2017, l'apparition du logiciel Hub en 2016 et plus récemment l'émergence du ZEB-Horizon en 2018 et de sa version backpack, le ZEB-Discovery en 2020.

Par rapport au ZEB-Revo, le ZEB-Revo RT, nous intéressant dans cette étude, n'a de changement que le fait qu'il permet la visualisation des données en temps réel lors du levé. Ces deux appareils offrent donc les mêmes polyvalences et peuvent être utilisés dans des domaines tels que le calcul de volume de stockage, les scans de biomasse ou encore la cartographie de zones sous-terraines [9].

[3] « data science research and engineering », <https://data61.csiro.au/en/About>, (consulté le 01/04/2020)

II.1.1 Principes et composants

Le ZEB-Revo RT est donc un scanner portatif à main, capable de cartographier et de se repérer au sein de l'environnement dans lequel il évolue par le biais de l'acquisition de données issues d'un capteur lidar, couplé avec une centrale inertielle de type MEMS. Grâce à une centrale de calcul, le système est capable de réaliser cette cartographie en temps réel et d'en donner une visualisation à l'opérateur par le biais d'une connexion wifi.

Le capteur lidar utilisé (*Hoyuko* UTM-30LX-F) est un scanner laser effectuant des mesures en 2D sur 270° avec une fréquence de 100 Hz et une résolution angulaire de 0.625°. Les rayons sont émis dans le proche infrarouge ($905x10^{-9}$ m) et le calcul de distance se fait par mesure du temps de vol entre la tête du scanner et l'objet mesuré [10].

Le constructeur avance dans [11] que les précisions des mesures sont respectivement égales à ± 0.03 m pour des objets vus entre 0.1 et 10 m et ± 0.05 cm pour des objets entre 10 et 30 m. De la même façon, la répétabilité des mesures est indiquée comme ayant un écart type respectivement inférieur à 0.01 et 0.03 m. Il nous fait également part du fait que la distance mesurée est très influencée par les conditions environnementales et la luminosité ambiante. Selon [8], la mesure du distance-mètre lidar est aussi entachée d'une erreur composée d'une constante et d'une variable de distance de 0.005 m + 0.001 m/m.

Selon [12], la centrale inertielle de type MEMS utilisée est quant à elle d'une qualité moyenne (*MicroStrain* 3DM-GX2). Elle est montée sous le scanner et fournit les vitesses angulaires et accélérations grâce aux gyroscopes et accéléromètres triaxiaux qui la composent. Elle possède également un magnétomètre 3 axes.

Le tout est monté sur un axe rotatif, permettant au scanner de fournir des données en trois dimensions grâce à la rotation des plans 2D [10] autour de l'axe perpendiculaire à la poignée, avec une résolution angulaire de 1.8° et une fréquence de 0.5 Hz [13].

Il apparait évident que les caractéristiques du ZEB-Revo RT [13] sont fortement liées à celles du scanner lidar. Ainsi, des précisions relative de 0.01 à 0.03 m et absolue de 0.03 à 0.30 m (pour une seule boucle de 10 minutes) sont avancées, tout comme une portée maximale de 30 m. Cette portée n'est cependant que de 15 à 20 m en extérieur selon les conditions environnementales. De même, des études telles que celle de Bastien Ricard [14] notent des méfiances vis-à-vis de ces chiffres, avec une portée effective intérieure mesurée à 21 m. D'autres spécifications sont avancées par *GeoSLAM* [10] comme notamment un bruit de mesure de ± 0.03 m.

II.1.2 Algorithme SLAM

Pour réaliser l'ensemble des calculs et traitements afin de générer le nuage de points 3D, le ZEB-Revo RT s'appuie donc sur un algorithme SLAM. *GeoSLAM* [15] nous apprend que ce denier permet de calculer de manière itérative la meilleure estimation de la position du mobile dans l'environnement à partir des informations des capteurs lui parvenant, et de le faire d'autant plus précisément que ces éléments seront mesurés de fois. Selon Ivona Hubova [16], la gamme de produits repose ainsi sur le SLAM à temps continu, modélisant la trajectoire comme une fonction continue du temps, décomposée en une phase locale (sur des portions du levé) et une phase globale (sur l'ensemble de l'acquisition)[4].

En étudiant les documents de Michael Bosse et Robert Zlot [17] [18] [19], il est possible de mieux comprendre les grandes lignes de l'algorithme SLAM employé. Ces études sont issues de recherches effectuées au *CSIRO* et même si des modifications ont été effectuées au fil du développement de *GeoSLAM*, «le ZEB-Revo reste essentiellement un ZEBedee avec un outil différent mais un même algorithme »[5].

Ainsi, selon [17], lors de la phase locale, l'algorithme met en œuvre le principe de *scan matching* et, à partir d'une représentation discrétisée de l'environnement, la correspondance entre les points est trouvée par le biais d'une approche semblable à celle de l'ICP. Elle est donc divisée en deux étapes, avec la recherche des correspondances (associant chaque point à son point le plus proche au sein du nuage) puis, selon [18], des transformations qui minimisent l'erreur entre les correspondances et les déviations des mesures de la centrale inertielle.

Comme explicité dans [19], cette phase locale est itérative et travaille ainsi en fonction de segments temporels de trajectoire (fenêtres de temps durant lesquelles la trajectoire est estimée). Un segment est ainsi initialement défini puis avancé au fil du traitement, en fonction d'un pas de temps défini et égal à une fraction de la longueur de ce dernier. Les auteurs de [18] nous expliquent qu'au sein d'un segment, le nuage est ainsi reconstitué en estimant la trajectoire par intégration des données de la centrale inertielle. L'espace est ensuite décomposé en *voxels*, dans lesquels sont identifiés des *clusters*, composés des points temporellement proches.

[4] Annexe 1
[5] « ZEB-Revo is basically a Zebedee with different hardware but the same software », Tom Lowe [20]

Tom Lowe [20] énonce le fait que ces *voxels*, sont définis en fonction d'une grille multi résolution croissante, dans le but de trouver les surfaces les plus planes possibles. Chaque *cluster* ainsi identifié et possédant un nombre de points suffisant est ensuite caractérisé par le biais de sa position (centroïde de l'ellipsoïde formée par l'ensemble des points), de sa normale, si la surface est suffisamment plane, et du temps de mesure (moyenne des temps de mesure des points) [19]. Selon [18], les *clusters* ainsi retenus et caractérisés sont appelés des *surfels* et la correspondance entre deux d'entre eux se fait seulement s'ils sont réciproquement identifiés comme correspondants.

Suite à cela, le processus cherche à trouver les transformations optimales en ajustant la trajectoire à des pas d'échantillonnage donnés. L'étude [19] nous indique que pour ce faire, le système résout itérativement un système linéaire, composé de contraintes de correspondances entre les *surfels*, de lissage de la trajectoire (pour assurer une trajectoire réaliste) et de continuité de cette dernière (par le biais de conditions initiales fixées pour chaque segment). La solution trouvée est ainsi constituée des corrections à appliquer à la trajectoire à chaque pas d'échantillonnage, et est ensuite lissée par le biais d'une spline cubique avec un pas de temps plus faible [17]. En plus des *surfels* au sein du segment courant, il est intéressant de noter que des *surfels* des précédents segments sont enregistrés et ajoutent des contraintes supplémentaires en cas de correspondance avec le segment courant.

À la suite de cette phase locale, la trajectoire peut être considérée comme localement précise mais elle peut être améliorée par une phase globale. Les auteurs de [19] nous apprennent que cette dernière suit les mêmes principes et étapes que la phase locale mais fonctionne sur la trajectoire dans sa totalité. La seule différence pouvant être relevée est la disparition des contraintes de continuité de trajectoire puisque cette dernière est globalement traitée. Cette phase globale fait également l'objet de deux calculs consécutifs.

II.1.3 Logiciel GeoSLAM Hub

Malgré tout, même si le ZEB-Revo RT peut fournir une cartographie de son environnement et afficher la trajectoire effectuée au sein de ce dernier en temps réel grâce à la centrale de calcul, le passage par le logiciel *Hub* est tout de même nécessaire. Ce dernier permet donc d'importer les données du levé pour décompresser les fichiers issus du levé de terrain et, au besoin, de recalculer une ou plusieurs boucles.

Le recalcul de ces boucles peut être fait en changeant certains paramètres pour tenter d'obtenir de meilleurs résultats[6]. Ces paramètres correspondent soit à des curseurs à valeurs modifiables soit à des options à activer ou désactiver, et se divisent en deux catégories, suivant les mêmes phases locale et globale de l'algorithme [21].

Ainsi parmi les paramètres locaux, il est possible de changer :

- *Convergence Threshold* : permet d'influer sur le nombre maximal d'itérations et donc sur la finesse du calcul,
- *Window Size* : permet de modifier la taille des échantillons et ainsi de rechercher les correspondances entre les *surfels* sur des segments plus grands,
- *Voxel Density* : provoque l'utilisation de *voxels* plus ou moins grands, permettant de détecter des surfaces d'appuis au calcul plus ou moins grandes,
- *Rigidity* : définit si l'algorithme est plus ou moins influencé par les données de la centrale inertielle ou du lidar pour initier le déplacement,
- *Prioritize laser constraints* (PLC) : traite les données en se concentrant plus sur les informations du capteur lidar.

De la même façon on peut influer sur la phase globale via les paramètres suivants :

- *Prioritize planar surfaces* : provoque le fait que l'algorithme ne va faire correspondre que les surfaces considérées comme très planes,
- *Convergence Threshold* : permet d'influer sur le seuil de convergence de la consolidation globale,
- *Rigidity* : définit le niveau d'influence entre centrale inertielle et lidar comme précédemment.

Le logiciel présente également des options de recalage de boucles (*Merge*) et de traitement du bruit (*Smooth*), expliquées et utilisées par la suite (partie IV).

II.2 État de l'art des études existantes

En plus de sa polyvalence, le ZEB-Revo RT est annoncé comme pouvant être jusque 10 fois plus rapide que les méthodes de relevés traditionnelles (par scanner statique ou par distance-mètre) [22]. Ce scanner suscite donc un grand intérêt et est sujet à de nombreuses études pour en évaluer les réelles capacités et utilisations possibles.

[6] Annexe 1

II.2.1 D’un point de vue général

Les premières études menées, ont ainsi concerné le levé d’éléments de patrimoine architectural et de sites naturels.

De par son étude sur le levé d’une falaise et de zones sous cavées [23], le *BRGM* nous apprend que le scanner est plus performant dans les milieux à géométries complexes. Ainsi, la qualité de traitement par l’algorithme SLAM est de bonne qualité dans les zones sous cavées ou dans les secteurs présentant une certaine rugosité et des obstacles remarquables dans les trois dimensions, mais peu fiable sur les zones ouvertes ou comportant des objets mobiles. Il est également montré que la portée effective du scanner est fortement influencée par la luminosité, avec en extérieur 95 % des points scannés se trouvant à moins de 4.30 m de la position du scanner, dont 50 % à moins de 1.45 m. L’étude conclut donc que le scanner ZEB-Revo est efficace dans les zones sous-cavées mais n’est pas adapté aux grandes étendues.

L’étude portant sur les carrières d’Hermonville [24] nous informe que le niveau de précision théorique des nuages obtenus par le ZEB-Revo est suffisant pour établir des cartes d’aléas. En effet, les boucles réalisées lors du levé s’avèrent cohérentes entre elles et la résolution du nuage est le plus souvent inférieure à 1 pt / 0.01 m. L’étude conclut donc que le scanner est adapté à une utilisation dans le domaine de la géomorphologie.

Les recherches de Dewez et al. [8] nous apportent également des informations sur la densité des points du nuage, en nous indiquant que cette dernière est d’en moyenne 1 pt / 0.005 m sur le levé réalisé. En revanche, elles s’intéressent de manière plus approfondie à l’erreur de digitalisation au travers des tests d’ajustement de plans et de calculs de rugosités. On apprend ainsi que l’acquisition d’un nuage plus dense (par le biais d’une vitesse d’acquisition plus lente ou d’une distance aux objets scannés plus courte) ne permet pas une meilleure définition de la forme des surfaces, à cause de l’utilisation d’instruments de précision limitée. Lors de l’étude de la justesse de mesure à l’échelle du chantier, ici le levé d’intérieur d’un bâtiment structuré (sous-entendu avec des formes géométriques nettes, facilement identifiables et correctement réparties), les mesures du ZEB-Revo sont comparées avec celles d’un distance-mètre et les écarts constatés sont inférieurs à 0.003 m sur une distance de 30 m.

Enfin dans la revue globale des solutions 3D faite par *English Heritage* [6], le bruit du ZEB-Revo est qualifié comme important (± 0.03 m) et ne permet pas de discerner certains détails tels que les moulures. L'étude annonce donc qu'il semble difficile d'utiliser ce scanner pour la réalisation de plan à l'échelle 1/50 mais précise que ce dernier peut parfaitement être utilisé en complément des technologies de scanner statique ou pour la réalisation de plans à plus grande échelle.

L'ensemble de ces études confirment donc les assertions de *GeoSLAM* et que le ZEB-Revo RT est utilisable dans les domaines ne nécessitant pas une grande précision.

II.2.2 Au sein des cabinets de géomètres

Aussi, dans le but d'élargir les utilisations de l'appareil ou de réformer leurs procédures de travail, les géomètres l'ont également étudié pour rendre compte de ses capacités dans leurs travaux, « où les précisions demandées sont plus importantes »[7].

Au sujet de la répétabilité de mesure, Bastien Ricard [14], nous montre que 93 % des écarts, entre les points issus de deux nuages, sont inférieurs à 0.025 m et que la moyenne de ces derniers est de 0.014 m mais peut être réduite en supprimant les points aberrants (ayant un écart de plus de 0.15 m).

Sur le bruit de mesure, les études de Gabriel Bergé [1], Jean-Baptiste Gherissi [25] et Marie Schoenmaekers [26] se recoupent et quantifient ce dernier entre 0.03 et 0.04 m. De manière plus approfondie, en termes de reproductibilité, [25] nous fait remarquer que ce bruit peut être diminué avec l'accord de plus d'importance aux données lidar (en faisant varier le paramètre *Rigidity*). Également, Bastien Ricard [14] nous apprend que l'épaisseur de trait diminue avec une allure de levé plus lente pour atteindre 0.02 m, au contraire de Victor Morel [27] qui constate de meilleurs résultats à allure normale (0.045 m) plutôt que lente (0.048 m). Les deux études s'accordent en revanche sur le fait que le levé à allure rapide n'améliore pas ces résultats. Au-delà du simple aspect de l'épaisseur de trait, [27] étudie les impacts de la vitesse sur le bruit au sens de l'erreur de modélisation et nous communique le fait que la vitesse de levé n'influe que peu sur l'ajustement d'un plan à partir des points du nuage.

[7] Victor Morel [27]

En termes de géométrie de levé, lors du recalage relatif de plusieurs boucles, Victor Morel [27] constate des EMQ d'assemblage par méthode ICP de l'ordre de 0.03 m, et Bastien Ricard [14] obtient, sur des boucles plus petites et plus nombreuses, un écart moyen de recalage plus faible de 0.012 m (écart maximal entre deux nuages de 0.018 m).

Pour l'étude de la justesse de mesure, Bastien Ricard [14] démontre que, par rapport au plan dessiné à partir de nuages issus d'un scanner statique, les écarts du nuage dynamique observés sont inférieurs à 0.03 m mais atteignent 0.04 m aux extrémités du chantier. Dans son étude, Victor Morel [27] nous montre que la vitesse à laquelle le levé est effectué (lente, moyenne ou rapide) a une influence négligeable sur les valeurs de moyennes et d'écarts types des écarts entre les nuages dynamique et statique. Sur la répartition de ces derniers en revanche, le levé effectué à allure normale présente les meilleurs résultats (respectivement plus de 55 % et 80 % des écarts inférieurs à 0.01 et 0.02 m) alors que celui à allure rapide semble être le moins juste puisque 95% des écarts sont inférieurs à 0.125 m (contre environ 0.075 m à allure lente et normale). Il présente également les résultats d'une comparaison de cotes, mesurées sur un plan digitalisé et un plan réalisé par tachéométrie classique, et remarque que la moyenne et l'écart type des écarts entre les cotes sont respectivement de 0.004 et 0.012 m au sein d'une même pièce (50 cotes) et 0.006 et 0.031 m sur l'ensemble du chantier (30 cotes). Marie Schoenmaekers [26] nous communique le fait qu'entre le nuage obtenu au ZEB-Revo RT et un nuage statique, 90 % des écarts entre les points et la majorité des écarts entre les cotes mesurées sont inférieurs à 0.02 m. Aussi, les études [25] et [26] constatent que le bruit est centré sur la référence que constitue le nuage statique.

Enfin, il est également question dans ces travaux d'étudier la précision absolue et la dérive des nuages obtenus. Bastien Ricard [14], par le biais d'une comparaison entre un plan digitalisé et un plan topographique, recalés par transformation de Helmert, dénote une dérive de 0.06 m en intérieur et de 0.15 m en extérieur. D'une manière différente, Gabriel Bergé [1] quantifie la dérive de l'appareil en bout de levé linéaire, dans deux environnements différents, et constate que cette dernière augmente fortement en priorisant les données de la centrale inertielle dans le calcul. En revanche, il démontre que cette même dérive peut être réduite en effectuant des mouvements verticaux lents ou en réalisant deux boucles plus courtes plutôt qu'une unique. Dans sa démarche, il étudie également les écarts entre les deux nuages et dénote logiquement que ces derniers peuvent être diminuées des mêmes manières mais également en plaçant des amers au sein du levé.

Jean-Baptiste Gherissi [25] nous apprend quant à lui que la dérive en intérieur, par rapport à un nuage acquis par scanner statique, peut être réduite à 0.016 m en priorisant les données lidar et même baisser jusque 0.014 m en réajustant d'autres paramètres de recalcul (*Window Size* et *Voxel Density*). En extérieur en revanche, cette dernière est très importante, et même en ajoutant des amers et en ajustant les paramètres de calcul, il apparait une dérive de 0.20 m. Victor Morel [27], en assemblant par le biais d'un recalage Helmert, un plan issu du levé dynamique et celui issu d'un levé tachéométrique, obtient des EMQ de 0.029 m et dénote, sur un jeu de 100 écarts entre les points des deux plans, un écart type de 0.026 m avec cependant 28% d'entre eux supérieurs à 0.030 m.

En terme de méthodologie de levé, toutes les études s'accordent ainsi à dire que la réduction de la dérive provenant de la centrale inertielle entraine l'amélioration de la précision, tant relative qu'absolue. Pour ce faire, il convient de moins solliciter cette dernière lors du levé mais aussi au sein du calcul de trajectoire, en plaçant des amers ou en réalisant plusieurs petites sessions plutôt qu'une plus longue [14]. Pour le traitement, lors du paramétrage, il apparaît que la recherche de grands éléments géométriques avec des points communs proches (paramètres *Window Size* et *Voxel Density*) donne de meilleurs résultats [25]. Également, le fait de prioriser l'utilisation des données lidar plutôt que celles de la centrale inertielle (paramètre *Rigidity*) permet de réduire l'effet de dérive [1], mais aussi d'améliorer la forme du nuage par le biais d'un bruit moins important [25].

Au vu de l'ensemble de ces travaux, il semble donc que le ZEB-Revo RT ne soit pas adapté pour la réalisation de plans architecturaux à l'échelle 1/50 à cause de sa précision relative mais aussi de son bruit de mesure. Ce dernier, semble cependant constituer une limite en termes de niveau de détails plus forte qu'en termes de précision relative. Malgré tout, les différentes études menées montrent des résultats divers et il conviendra lors de la suite de la présente étude de ne pas retenir les affirmations quantitatives mais seulement les observations qualitatives relevées. Nous nous attacherons donc à définir la meilleure méthodologie qu'il soit et à quantifier les limites de précision relative et de niveau de détail du ZEB-Revo RT.

Il est aussi possible de remarquer, que le ZEB-Revo RT est un scanner conçu pour fonctionner dans des environnements intérieurs. Au regard des résultats que ce dernier montre en environnement ouvert ([14] [23]), seul les relevés d'intérieurs seront étudiés dans le reste de ce travail.

III Répétabilité de mesure et étude de bruit et résolution

Avant de réaliser les tests méthodologiques, il convient de vérifier que le scanner est en capacité de donner des résultats similaires au travers plusieurs levés. Pour ce faire, nous allons donc étudier sa répétabilité de mesure. Cette dernière permettra de déterminer le seuil sous lequel les mesures du ZEB-Revo RT ne peuvent pas être assurées et donc sous lequel, les changements apportés au nuage ne seront pas considérés comme significatifs.

III.1 Conditions de répétabilité

D'un point de vue mathématique, plus le nombre de mesurages est important et plus la répétabilité peut être affirmée avec précision. Cependant, d'un point de vue pratique et en se mettant dans la situation du ZEB-Revo RT (différente de la mesure d'une distance sur un banc d'étalonnage par exemple), il convient de spécifier que cela doit rester faisable et raisonnable. Aussi, de par la nature du levé, il est possible de remarquer que les conditions de répétabilité, dans lesquelles doivent être réalisés les mesurages, ne seront pas parfaitement identiques. En effet, la vitesse ne peut pas être exactement la même et les trajectoires entre les passages ne se superposeront pas de manière parfaite. Cependant, à la différence de la reproductibilité de mesure (partie IV) les conditions seront respectées de sorte à ce que les changements entre les levés ne soient pas significatifs.

Aussi, il convient de préciser que l'étude de répétabilité est ici effectuée sur la base de la méthodologie initiale (décrite par la suite) et au sein des différents environnements retenus pour les tests, afin de définir un seuil d'irreproductibilité propre à chacun.

III.2 Calculs et analyse de répétabilité

III.2.1 Mode et paramètres de calcul

Ainsi, une fois les levés effectués et traités sans modification de paramètres de *GeoSLAM Hub*, il est possible d'étudier ces derniers. Pour ce faire, plusieurs options sont envisageables mais la comparaison des nuages avec l'outil M3C2 de *CloudCompare* est retenue. Ce choix repose sur le fait que les études [12] et [28], comparant deux nuages de points entre eux, confirment les résultats de précédents travaux, évoquant le fait que les écarts ne suivent pas une distribution Gaussienne lors de l'utilisation de technologies 3D. Cette assertion peut être vérifiée aussi bien par le calcul, en s'intéressant à l'asymétrie (Skewness) et à l'aplatissement (Kurtosis) de la répartition des écarts, que graphiquement, en traçant les diagrammes quantile-quantile.

Si cela s'avère vrai, il conviendra alors d'utiliser des estimateurs statistiques plus robustes aux points aberrants (*outliers*) que la moyenne ($\bar{x}$) et l'écart type (σ), par le biais du calcul de la médiane (m_x) et de la déviation absolue normalisée à la médiane (NMAD). Aussi, des écarts inter-quantiles seront employés, avec par exemple Q(0.95) correspondant à l'intervalle dans lequel 95% des valeurs se situent. [8]

L'emploi de la fonction M3C2, selon la méthode développée par Dimitri Lague et al. [29], est donc préconisée car cette dernière est robuste aux *outliers*. Elle calcule la distance entre deux nuages de points à partir du calcul de normales locales (voisinage de diamètre *D*), en découpant les nuages en sous-ensembles par le biais de cylindres (de rayon *d* et de longueur maximale ajustable) et en prenant comme distance, celle entre les deux centroïdes des sous-ensembles projetés sur la normale (figure 2). Il faut cependant prendre garde aux valeurs *D* et *d* (échelles de normale et de projection) puisque si le nuage a une rugosité importante, les distances calculées peuvent s'en trouver surévaluées.

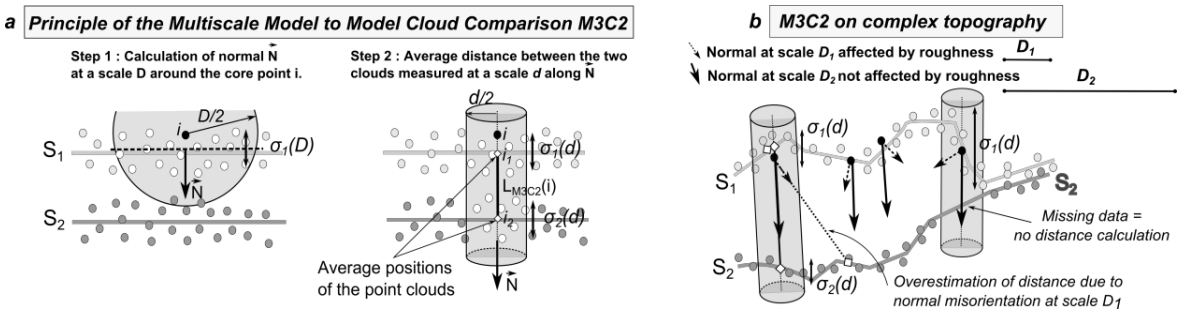


Figure 2 : Schéma du calcul de distance selon la méthode M3C2, source : Dimitri Lague et al. [29]

Ainsi, selon les auteurs de [29], les méthodes de comparaisons de nuages de points reposant sur le calcul de distance entre plus proches voisins, sont enclins à un biais pour la détection des petits écarts mais sont très utiles pour une détection rapide des écarts significatifs. L'approche M3C2 développée offre, quant à elle, sans modélisation du nuage, une mesure précise de ces écarts indépendamment de la densité des nuages, à condition de choisir les bonnes échelles *d* et *D*. Il est également important de préciser, que la fonction M3C2 calcule des valeurs d'incertitude sur le calcul d'écarts effectué (intervalle de confiance à 95 %), calculées principalement à partir des imprécisions de recalage entre les nuages et du bruit de mesure (évalué par le biais de la rugosité locale du nuage).

[8] Annexe 2

Dans le but de ne pas biaiser les résultats de comparaison, des tests de paramétrage de la fonction M3C2 ont été effectués et ont porté sur la variation de l'échelle *D* pour une échelle *d* fixe, et inversement. Les résultats nous montrent, qu'étant donné que les nuages n'ont pas une rugosité importante, le choix de *D* n'as pas d'effet significatif sur les paramètres statistiques calculés. On note tout de même le fait qu'en deçà de 0.10 m, la moyenne des incertitudes est plus importante et que malgré des variations faibles, à partir de 0.20 m, l'interquantile 95 % calculé se stabilise. De la même façon, pour l'échelle de projection *d*, le choix d'une valeur inférieure à 0.10 m a un impact non significatif sur les variables statistiques calculées. La moyenne des incertitudes d'écarts stagne à partir de 0.15 m et l'interquantile 95% à partir de 0.20 m. D'autres tests, réalisés en parallèle, nous montrent que le calcul des écarts en sous-échantillonnant les nuages biaise le résultat final. Le choix des paramètres portera donc sur une échelle *D* égale à 0.25 m, soit 20 à 25 fois la valeur de rugosité, comme préconisé dans [29], et une échelle *d* de 0.20 m. Le paramètre de convergence pour le recalage des deux nuages est fixé à 10^{-5} m.

III.2.2 Analyse des résultats

Avant tout, il est important de noter que, devant des valeurs d'incertitudes élevées pour la comparaison des nuages en environnements type hangar et industriel (ci-après définis), les échelles de *D* et *d* ont été respectivement réajustées à 0.50 m et 0.30 m.

Les environnements au sein desquels les tests se sont déroulés sont ainsi tels que :

- Environnement riche (A) (~ 275 m²) : environnement intérieur structuré comportant de nombreux amers, formés par l'ameublement présent. Il s'agit ici des bureaux de l'entreprise mais cela peut également correspondre à une habitation occupée ;
- Environnement type VEFA (B) (~ 175 m²) : environnement intérieur structuré ne comportant pas d'amers (pièces vides de tout ameublement) ;
- Environnement type hangar (C) (~ 350 m²) : environnement ouvert sur l'extérieur (non clos par 4 pans de murs) constituant un volume important du fait d'une grande hauteur sous plafond (entre 7 et 9 m) et de l'absence de cloisons intérieures. En termes d'amers, l'environnement tend vers un environnement riche ;
- Environnement industriel (D) (~ 1350 m²) : environnement clos avec ouvertures sur l'extérieur, constituant un volume important du fait d'une grande hauteur sous plafond (14 à 15 m) et de l'absence de cloisons intérieures. En termes d'amers, l'environnement tend vers un environnement pauvre ;

- Étages (E) (~ 240 m²) : ici, environnement type VEFA à deux étages (RDC et R+1), avec escalier à une extrémité du chantier.

			Écarts entre nuages		
	Nombre de nuages	Temps de levé	NMAD (m)	Incertitude (m)	Q (0.95) (m)
Env. (A)	4	≈ 7'00'	0.013	0.003	0.062
Env. (B)	2	≈ 2'30'	0.007	0.004	0.038
Env. (C)	3	≈ 1'30'	0.006	0.007	0.031
Env. (D)	3	≈ 3'30'	0.009	0.010	0.048
Env. (E)	3	≈ 4'00'	0.039	0.004	0.164

Tableau 2 : Synthèse des résultats mathématiques des écarts de l'étude de répétabilité

Avant toute exploitation des résultats (Tableau 2), il est utile de préciser que la colonne '*Nombre de nuages*' indique le nombre de nuages acquis dans des conditions de répétabilité et comparés au levé initial, acquis dans les mêmes conditions, que la colonne '*Temps de levé*' correspond au temps moyen des boucles effectuées et que les colonnes '*Écarts entre nuages*' présentent les moyennes des paramètres statistiques calculés à partir des résultats de la fonction M3C2 sur les x nuages de répétabilité acquis.

En se penchant sur le calcul des écarts entres les nuages, on remarque que, si pour les levés en environnements A, B et E, l'incertitude avec laquelle ces derniers sont effectués est la même, elle est plus élevée pour les environnements C et D, liés à des imprécisions de recalage plus importantes, causée par des plus longues distances de visée et donc une plus forte dispersion des points. Cette assertion est confirmée par le calcul des résidus de recalage, plus importants sur les nuages des environnements C et D. Les valeurs d'écarts entre les nuages, exprimées par le biais de NMAD et Q(0.95), sont en revanche variables en fonction des environnements. On remarque ainsi que si NMAD est presque la même entre les environnements B, C et D, elle est très supérieure pour l'environnement E, très probablement à cause du mode de calcul et de paramétrage de la fonction M3C2 (cylindre de longueur maximale de 0.20 m), qui, pour le sol d'un étage prend en compte le plafond de l'étage inférieur, et inversement (hypothèse rendu cohérente par un résidu pouvant être calculé à 0.015 m, du même ordre de grandeur que pour les environnements A et B).

Il est également possible de voir qu'en environnement A, cette valeur est légèrement plus importante, ce qui peut être dû à la configuration des lieux (enchainement de pièces autour d'un couloir) et au mode de levé (peu de temps passé au sein de chaque pièce). Cette hypothèse est motivée par le fait qu'il est possible de constater une rotation des pièces les unes par rapport aux autres, de l'ordre de 0.04 m (pour une hauteur sous plafond de 2.50 m). Il convient tout de même de préciser que par rapport à la réalité, il ne s'agit que d'une rotation, les pièces n'étant pas déformées. Ce point reste tout de même un point important à surveiller par la suite et nous alerte sur le fait qu'il faut être vigilant sur la méthode de levé et les passages de portes.

Les résultats d'écarts NMAD ainsi constatés, sont, pour les environnements A et B, supérieurs aux chiffres de répétabilité avancés par le constructeur (écart type inférieur à 0.01 m pour des visées entre 0 et 10 m), au contraire des environnements C et D qui y sont plus conformes (écart type inférieur à 0.03 m pour des visées entre 10 et 30 m). Malgré tout, par rapport aux résultats obtenus par Bastien Ricard [14], au sein d'un environnement de type A, et calculés par le biais d'écart plus proches voisins (similaire au calcul de résidu effectué par *CloudCompare*), les résultats obtenus sont similaires (0.017 contre 0.014 m).

De manière plus détaillée[9], les résultats de comparaisons individuelles, au sein de l'environnement riche (A), montrent une petite variation (près de 0.03m pour Q(0.95)), qui peut notamment être expliquée par le fait que la rotation des pièces constatée peut être différente et plus ou moins prononcée.

Les mesures effectuées au ZEB-Revo RT sont ainsi considérées comme répétables (écarts en dessous de 2cm avec une légère variation entre les environnements), bien qu'il convienne de vérifier cette assertion sur la méthodologie finale. Pour la suite de l'étude, le seuil d'irreproductibilité de chaque environnement est fixé comme égal à $NMAD \pm Incertitude$.

[9] Annexe 3

III.3 Limitations du bruit et de la résolution

Au-delà de l'étude des écarts entre les nuages, les travaux architecturaux se caractérisant par une précision relative et un niveau de détails important, liés à l'échelle d'édition des livrables (partie I.2), il convient de se pencher sur ces deux notions.

Il apparait ainsi qu'en plus de ne pas pouvoir être supérieur à la précision relative, le niveau de détails (plus petit élément dessiné) est lié à la résolution et au bruit du nuage. Cela semble logique puisque s'il est impossible de garantir une erreur de mesure de x cm, alors un niveau de détails inférieur ou égal à x m ne peut pas être obtenu. De la même façon, si la résolution du nuage est de 1 point / x m, alors tout objet de taille inférieur à x m ne pourra être représenté. Aussi, il faut remarquer que tout appareil de mesure est sujet à des bruits (perturbations du signal), plus ou moins importants selon la technologie employée, et résultant dans une imprécision de mesure. Ainsi, de toute évidence, pour quantifier les limites d'utilisations du ZEB-Revo RT, il conviendra de s'intéresser aux limitations dues au bruit et à la résolution du nuage.

Dans le cas du ZEB-Revo RT, le bruit est un phénomène très complexe puisque ce dernier résulte d'une multitude d'erreurs ou d'approximations à plusieurs étapes du levé et du calcul SLAM, et créé, dans le nuage, une épaisseur de trait dans laquelle se situe le plan ou l'objet à représenter. Selon Tom Lowe [20], le bruit est ainsi la combinaison du bruit issu des capteurs, de différents biais (par exemple, de la compensation de la lente dérive de la centrale inertielle avec le temps) mais aussi des erreurs de modélisation (dues à des simplifications de modélisation telles que la décomposition de l'espace en *voxels*).

À notre échelle, par le biais de tests méthodologiques, il apparaît impossible d'appréhender ou de compenser ce phénomène de bruit puisque, par exemple, les bruits de mesures du capteur lidar créent de l'imprécision, ensuite intégrée dans le calcul SLAM, engendrant d'autres imprécisions. Il nous est en revanche possible de remarquer et de quantifier au travers quelles méthodologies ce bruit est le plus faible. Pour ce faire, au sein de chaque nuage, des éléments plans (murs, sols et/ou plafonds), de tailles variables, ont été extraits dans le but de pouvoir y ajuster un plan. Pour chaque points de ces éléments, l'écart au plan a donc ensuite été calculé par le biais de *CloudCompare* puis différents paramètres statistiques ont pu être calculés (Tableau 3). Pour chaque nuage, les valeurs de bruit correspondent donc à la moyenne des valeurs obtenues sur les divers éléments plans extraits.

En termes de résolution, les études [8] et [24], avancent des résolutions spatiales inférieures à 1 point / 0.01 m (partie II.2.1) et l'étude [8] évoque le fait que cette résolution ne peut pas être anticipée pour un levé au ZEB-Revo RT puisque chaque surface peut être observée plusieurs fois et depuis des points de vue différents. Ainsi, cette dernière sera, elle aussi, quantifiée à chaque test effectué. Pour ce faire, à partir des mêmes portions de nuages extraites pour calculer le bruit, la résolution est calculée sur 1 % des points du nuage (pour des raisons de temps de calcul) et égale à la moyenne des distances entre les points retenus et leur plus proche voisin.

Il faut également remarquer, qu'au-delà de la résolution spatiale des points, le niveau de détails est limité par la taille de l'empreinte du rayon laser (taille du faisceau laser à son impact avec la surface), causée par la divergence de ce dernier, accrue avec la distance parcourue (Figure 3). Selon un article paru dans la revue XYZ [31], le niveau de détails est ainsi égal à un tiers de la taille de l'empreinte laser. En remarquant donc que les visées effectuées lors des différents tests sont majoritairement comprises entre 0 et 5 m, mais également à partir des informations constructeur [32] (empreinte laser rectangulaire, de taille 0.40 * 0.08 m à 30 m et d'orientation variable selon l'angle de visée), il est possible de voir que la taille de cette empreinte est donc de 0.07 * 0.03 m (en supposant une augmentation linéairement avec la distance et un diamètre d'ouverture nul, faute d'informations supplémentaires).

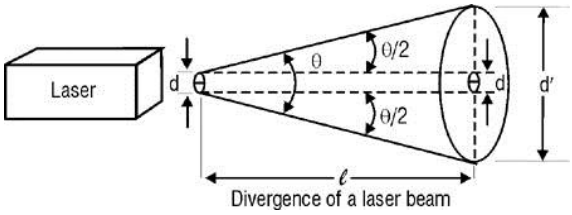


Figure 3 : Schéma de divergence du faisceau laser, source : www. physics.stackexchange.com

Avant de réaliser l'étude de reproductibilité, il convient donc de donner les valeurs de résolution et de bruit initiales (Tableau 3). Pour chaque environnement, les valeurs présentées correspondent aux moyennes des valeurs de bruit calculées pour chaque nuage acquis dans les conditions initiales. À l'image des écarts entre nuages précédemment explicités (partie III.2.2), le bruit ne suit pas une loi normale et sa répartition statistique est donc quantifiée par NMAD. Ce dernier est également quantifié au sens de l'épaisseur de trait, bien plus explicite, correspondant à la valeur interquantile à 90 % (correspondante à l'épaisseur de trait observable les orthophotos générées). À titre informatif, en environnement riche (A), les valeurs moyennes d'asymétrie et d'aplatissement sont respectivement égales, en moyenne, à 0.818 et 12.465 sur l'ensemble des données et à 0.107 et 3.318 en ne retenant que 99.74 % des valeurs (± 3σ) (elles doivent en théorie être égales à 0 et 3 pour un échantillon de données suivant une loi normale).

			Bruit		
	Nombre de nuages	Nombre d'éléments plans extraits	Épaisseur de trait (m)	NMAD (m)	Résolution (m)
Env. (A)	4	8	0.029	0.008	0.008
Env. (B)	2	7	0.026	0.007	0.008
Env. (C)	3	1	0.042	0.012	0.012
Env. (D)	3	6	0.035	0.010	0.013
Env. (E)	3	10	0.028	0.008	0.009

Tableau 3 : Synthèse des résultats initiaux de bruit et résolution

Les résultats obtenus (Tableau 3) nous permettent ainsi de constater qu'au sein des environnements A, B et E, le bruit peut se traduire par une épaisseur de trait comprise entre 0.025 et 0.030 m, correspondant aux valeurs annoncées par le constructeur et dans les travaux connexes. Au sein des environnements C et D en revanche, cette dernière est supérieure, de manière très légère pour D (environnement type industriel) mais plus significative pour C (environnement type hangar). Cela peut nous laisser penser que le bruit est augmenté par la luminosité puisque, pour rappel, l'environnement C est sujet à une luminosité plus importante. Les mêmes remarques peuvent être faites sur la répartition du bruit, quantifiée par NMAD. De manière plus détaillée, au sein de chaque environnement, le bruit peut être considéré comme répétable (dans le sens où il présente des valeurs similaires au sein de chaque environnement), avec des écarts inférieurs à 0.01 m pour l'épaisseur de trait et 0.002 m pour Q(0.95). Il est important de remarquer que, si le calcul du bruit n'as porté que sur des éléments de sol pour les environnements C et D, cela n'as aucune incidence sur le résultat puisque, en environnement A, B et E, les calculs ont portés à la fois sur des éléments de sol et de murs et aucune différence ne peut être faite.

Le bruit résultant des levés effectués au ZEB-Revo RT, mesuré en moyenne à des distance de 1.5 à 3 m, peut donc être quantifié entre 0.025 et 0.035 m (0.04 m lorsque le scanner est exposé à une forte luminosité).

Enfin, en termes de résolution, on peut aisément remarquer que celle-ci ne change pas en fonction de l'environnement (entre 0.008 et 0.009 m), ce qui semble logique du fait que les éléments utilisés pour le calcul sont vus depuis des distances similaires. Selon les conclusions du document d'*English Heritage* [6], cette résolution permettrait d'avancer un niveau théorique de détails de 0.016 m (2*0.008 m).

Cependant, limité par la taille de l'empreinte laser (ne permettant que la distinction d'éléments d'une taille supérieure à un tiers de cette dernière (0.022 m)) et par le bruit du nuage (0.035 m), le niveau de détails global pouvant être obtenu avec la méthodologie de levé initiale est de 0.035 m.

IV Reproductibilité de mesure en fonction de la méthodologie

Après avoir déterminé ce seuil, nous allons pouvoir remarquer dans quelles conditions de levé et avec quels paramétrages de traitement il est possible d'obtenir les meilleurs résultats. Pour ce faire, il convient de tenir compte de la méthodologie de levé préconisée par *GeoSLAM* [10] et des retours d'expérience de l'entreprise, mais aussi des résultats probants ayant déjà été constatés dans les travaux connexes (partie II.2).

D'une manière générale, les conditions de levé initiales sont ainsi telles que :

- Réalisation d'une ou plusieurs boucles fermées en respectant un recouvrement minimum de 30 % entre les boucles [14], en ayant au moins une pièce commune (un couloir commun est insuffisant) [30] ;
- Ajout de formes primitives facilement détectables (amers), idéalement d'une taille minimale de 1 m et égale à 1/10 de la distance à laquelle elles sont scannées [10] ;
- Transition entre les environnements de sorte à ce que le scanner puisse toujours reconnaitre des formes précédemment scannées et reconnues (passage des portes en marche arrière notamment) [27] ;
- Allure de levé lente ou moyenne (les résultats en allure rapide n'étant pas probants [14] [27]) ;
- Durée maximale de levé de 20 minutes par boucle [30] mais la plus faible possible afin de limiter la dérive [1] ;
- Pas de phase immobile de la tête du scanner pour ne pas détériorer d'autant plus les performances de la centrale inertielle [1].

IV.1 Tests entrepris

Pour étudier la reproductibilité de mesure et tenter d'améliorer les résultats explicités, nous allons dorénavant faire varier un à un des paramètres de levé, mais aussi de calcul de boucle, proposés par le logiciel *GeoSLAM Hub* (partie II.1.3). Les différents nuages obtenus seront comparés à l'échelle globale, avec le nuage de points issu de la méthodologie initiale, par le biais de la fonction M3C2, pour les mêmes raisons que celles explicitées lors de l'étude de la répétabilité (partie III.2).

Également, pour chaque nuage, les mêmes éléments plans que précédemment (murs, sols et/ou plafonds) ont été extraits, afin de pouvoir effectuer les calculs de bruit et de résolution. Pour chaque environnement, les tests présentant les résultats les plus probants (ayant le plus d'impact sur la méthodologie initiale c'est-à-dire avec des écarts supérieurs au seuil d'irreproductibilité fixé) sont ainsi retenus.

IV.1.1 Variations des paramètres de levé

Lors du levé, il est possible d'influer sur de nombreux paramètres, parmi lesquels :

- Allure de levé : le levé de référence étant acquis à vitesse moyenne (normale), un second levé est effectué à allure plus lente ;
- Distance Scanner-Objet : la variation de ce paramètre prend plusieurs formes (trajectoire passant plus proche des murs et des objets à scanner ou réalisation de mouvement horizontaux ou verticaux avec la tête du scanner), des précisions seront données pour chaque cas ;
- Placements d'amers : ce dernier peut également prendre plusieurs formes en fonction des levés ou ne pas avoir été réalisé en fonction des contraintes de terrain, des précisions seront donc données pour chaque cas ;
- Luminosité ambiante : comme explicité lors de la présentation du scanner (partie II.1.1), le capteur lidar est sensible à la luminosité ambiante, lorsque que cela était donc possible, un levé dans une luminosité moins importante a été réalisé ;
- Géométrie de levé : l'attention a ici été portée sur l'articulation des boucles du levé. Les tests ont pour but, à la fois de relater si le fait de multiplier les boucles de petites tailles plutôt que d'en effectuer une seule plus grande permet l'obtention de meilleurs résultats, mais également de voir quel type de recalage entre les boucles est le plus efficace. Plusieurs de ces derniers sont ainsi comparés par le biais de l'utilisation de la fonction *Merge* de *GeoSLAM Hub* et par un recalage nuage - nuage avec le logiciel *Realworks*, en utilisant uniquement les données dynamiques mais aussi en les associant à des données statiques (assemblage alors effectué pour chaque boucle sur les données statiques, couvrant la zone de recouvrement).

La fonction *Merge* (*GeoSLAM Hub*) permet, après un premier recalage manuel et approximatif des nuages, l'ajustement automatique du recalage par le biais de l'algorithme SLAM [21]. Aucune précision supplémentaire n'est donnée mais il est possible de penser que le logiciel, de la même façon que l'algorithme précédemment décrit (partie II.1.2), recale les deux nuages à partir de contraintes entre les *surfels* communs.

IV.1.2 Variations des paramètres de traitement

En plus de faire varier les paramètres de levés, nous avons également procédé au recalcul de la boucle du nuage initial, en modifiant, toujours de manière individuelle, les paramètres du logiciel *Hub* (partie II.1.3). L'option d'export *Smooth* présente dans ce dernier a également été testée. Cette option permet, selon le guide du logiciel [21], de réduire le bruit en analysant les formes d'un objet et de son voisinage par le biais des normales. C'est une fonction itérative qui n'élimine aucun point du nuage.

IV.2 Reproductibilité de mesure en environnement riche

Premier environnement ayant fait l'objet de tests, l'environnement riche (A) correspond ici aux bureaux de l'entreprise. Les paramètres de levé et de traitement présentant les meilleurs résultats sont donc ici présentés (Tableau 4). La signification des colonnes est identique à celle des précédents tableaux (Tableau 2 et 3) et la ligne '*Initial*' correspond aux résultats trouvés lors de l'étude de répétabilité (partie III)

	Écarts entre nuages			Bruit		
	NMAD	Incertitude	Q (0.95)	Épaisseur de trait	NMAD	Résolution
Initial	*0.013*	*0.003*	*0.063*	*0.029*	*0.008*	*0.008*
Allure lente	0.019	0.003	0.100	0.027	0.007	0.007
Distance aux objets diminuée	0.017	0.003	0.082	0.024	0.007	0.007
Recalage (2 boucles) :						
• Hub	0.017	0.003	0.075	0.023	0.007	0.008
• Données dynamiques	0.016	0.003	0.080	-	-	-
• Données dynamiques et statiques	0.018	0.003	0.079	-	-	-
PLC activé	0.011	0.003	0.060	0.034	0.009	0.008
Smooth activé	0.006	0.003	0.036	0.023	0.007	0.007
Voxel Density (-1)	0.006	0.003	0.033	0.023	0.005	0.008

Tableau 4 : Synthèse des résultats probants de l'étude de reproductibilité en environnent riche, résultats exprimés en mètre(s)

Les lignes '*Recalage (2 boucles)*' présentent les résultats des différents recalages en effectuant 2 boucles au lieu d'une seule et les lignes '*PLC activé*' et '*Smooth activé*' correspondent aux tests effectués avec chacun de ces paramètres activé.

En termes de géométrie de levé, il est ainsi possible de remarquer qu'entre les 3 modes de recalage sur 2 boucles ici comparés, les écarts constatés sont similaires et que ces recalages n'étant qu'une transformation de coordonnées, les valeurs de bruit et de résolution restent inchangées. À titre informatif, les mêmes tests ont été effectués en réalisant 3 boucles mais les résultats étant similaires pour une mise en application plus longue, cette option n'est pas retenue.

En termes de méthodologie de levé, il s'avère que seule une allure de levé plus lente (boucle de 10'30'' contre 7'00'' initialement) et une distance scanner - objet plus courte (mouvements horizontaux et boucles plus grandes dans chaque pièce - Figure 4) offrent des résultats probants. On peut tout de même remarquer que le test de distance scanner – objet offre une légère diminution de l'épaisseur de trait. Aussi, il s'avère que ce dernier test, engendrant une trajectoire plus importante dans les bureaux et donc plus de temps passé dans ces derniers, permet de corriger le problème de rotation des pièces entre elles, précédemment abordé puisque ce dernier est visuellement bien moins important, voire inexistant. À noter que, les tests de placements d'amers (disposition de chaises et de caisses de matériel) et de luminosité (tous stores baissés et lumières éteintes), également effectués, ne montrent pas de changement significatif. Il faut tout de même souligner le fait que les nuages acquis lors de ces deux tests ont dû être recalculés avec l'option PLC car leurs géométries étaient visuellement incorrectes.

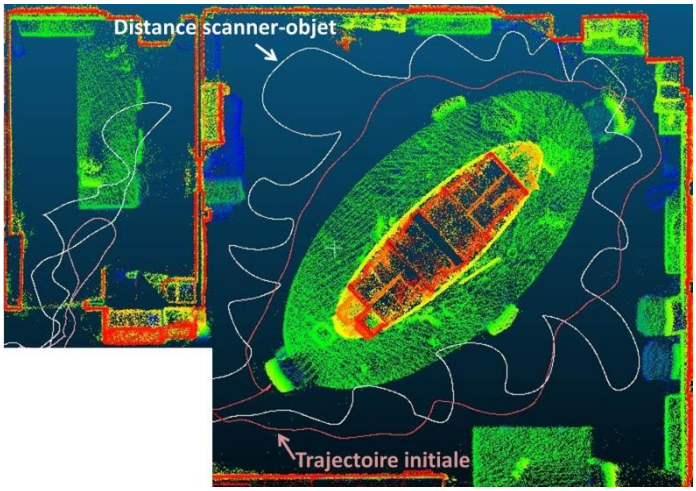


Figure 4 : Comparaisons des trajectoires initiale et de distance scanner-objet plus courte

En variant les paramètres de traitement, il est possible de remarquer que les impacts sont bien moins importants que ceux observés sur les paramètres de levé et sont inférieurs au seuil d'irreproductibilité, fixé pour rappel à $NMAD \pm Incertitude$.

Malgré tout, on peut observer que le paramètre *Prioritize Laser Constraints* (PLC) est celui qui permet l'obtention du plus de variations en termes d'écarts. Aussi l'option de traitement *Voxel Density*, ici fixée à -1 (découpage de l'espace en *voxels* de grande taille), ainsi que l'option d'export *Smooth*, permettent de réduire le bruit du nuage, à la fois en termes d'épaisseur de trait mais aussi de répartition. Il est même possible de remarquer que le paramétrage de *Voxel Density* à -1, est plus efficace.

IV.3 Reproductibilité de mesure en environnement moins favorable

En plus des tests en environnement riche, d'autres ont également été réalisés au sein d'environnements a priori moins favorables à l'évolution du ZEB-Revo RT car composés de moins d'amers et/ou constitués de volumes et surfaces plus grands et non nécessairement clos (et donc soumis à une luminosité plus importante). Malgré tout, les résultats obtenus au sein de ces environnements seront probablement moins significatifs puisque les boucles réalisées ont des durées bien moins importantes.

IV.3.1 Environnement de type VEFA

Le premier de ces environnements est celui de type VEFA (B), plus pauvre en amers que l'environnement riche (A) (car pas d'ameublement) mais toujours de la taille d'une habitation. Pour rappel, la durée des boucles au sein de ce dernier est de 2'30''.

Les résultats[10], nous permettent de remarquer que les changements détectés sont à la limite, voir inférieurs, au seuil d'irreproductibilité fixé, rejoignant l'idée que les résultats sont moins significatifs. Malgré tout le fait d'effectuer le levé à allure plus lente (boucle de 3'30''), de placer des amers (cartons de tailles comprises entre 0.80m et 1.50m au centre des pièces) ou encore de réaliser des mouvements horizontaux avec la tête du scanner permettent d'influer sur le nuage au sens de Q(0.95). Un placement d'amers de manière plus dense (plusieurs amers par pièces dans les grandes pièces), dégrade les résultats de bruit en plus de ne pas avoir d'effet significatif sur le nuage, rejoignant ce que nous avons pu aborder en environnement riche, à savoir que la surabondance d'amers n'as aucune utilité, ces derniers ne sont donc susceptibles d'être utiles qu'en environnement pauvre et avec parcimonie.

[10] Annexe 4

En ce qui concerne les options de recalcul de la boucle SLAM, on remarque, qu'à l'inverse de ce qu'il est possible d'observer en environnement riche, le fait de fixer le paramètre *Voxel Density* à -1 dégrade les valeurs de bruit (0.033 contre 0.026 m), alors que le fait de fixer ce dernier à 3 (utilisation de *voxels* plus petits) permet de les réduire de manière très légère (0.024 m). Il est ainsi possible d'émettre l'hypothèse selon laquelle l'option *Voxel Density*, à défaut d'être impactante sur le nuage, permet d'obtenir de meilleurs résultats de bruit à condition d'être correctement paramétrée. Pour ce faire, il semblerait que le calcul basé sur de grands *voxels* (paramètre à -1) soit bénéfique en environnement riche alors que le calcul basé sur de petits *voxels* (paramètre à 3) le soit en environnement pauvre.

IV.3.2 Environnement de type hangar

Pour cet environnement (C), il faut noter une particularité lors du levé, à savoir que l'ensemble des tests de répétabilité et de reproductibilité de levé se sont déroulés en minimisant le levé à ciel ouvert (sans faire le tour du bâtiment, durée de 2'00'' – trajectoire B) alors que les tests de reproductibilité de traitement ont portés sur une boucle faisant le tour du bâtiment (trajectoire A, durée de 2'50'').

Le but d'effectuer une trajectoire sur le modèle A est de confirmer que le ZEB-Revo RT peut difficilement être employé pour effectuer des relevés de façades. Ainsi lors du levé de l'extérieur du bâtiment, nous avons pu remarquer qu'en raison du peu d'amers entourant le scanner, le signal lumineux témoignant de la qualité du calcul SLAM, indiquait souvent une mauvaise qualité. Pour améliorer le levé, le scanner a donc été orienté à 45° vers la façade, plutôt que parallèlement, et lorsque le signal lumineux indiquait une mauvaise qualité, nous sommes retournés sur nos pas pour assurer le calcul correct de la trajectoire. Le levé en extérieur et avec peu d'amers reste donc sensible avec le ZEB-Revo RT et il convient de s'assurer d'une bonne qualité générale lors de l'acquisition.

Les résultats[11] nous permettent de dire que les trois tests effectués sur le modèle de trajectoire B (allure lente, mouvements verticaux et horizontaux) présentent des résultats significatifs en termes d'impact sur le nuage initial, bien qu'aucun n'améliore les chiffres de bruit et de résolution (respectivement de 0.044 et 0.013 m). Il est d'ailleurs possible de voir que le fait d'effectuer des mouvements verticaux dégrade le bruit (0.054 m).

Pour les levés basés sur la trajectoire A (comparés avec un levé de la même emprise et acquis dans les conditions initiales), il est possible de voir que les chiffres d'écarts sont plus importants que ceux constatés au sein de l'ensemble des environnements déjà étudiés mais sont cohérents entre toutes les options de retraitement ici testés. Les résultats, nous montrent tout de même que les options PLC, *Convergence Threshold* (fixée à 5) et *Rigidity* (à -5) sont les options de recalcul ayant le plus d'impact sur le nuage. Pour autant, aucune n'as d'effet positif en termes de bruit ou de résolution et l'option PLC dégrade ces chiffres par rapport au nuage initial (bruit de 0.053 m contre 0.044 m). Seule l'option *Voxel Density* permet l'obtention de meilleurs résultats en termes de bruit (épaisseur de trait respective de 0.039 et 0.037 m en fixant le paramètre à -1 et 3). La réalisation du levé à allure plus lente ne présente aucune amélioration en termes de bruit ni d'écart significatif par rapport aux recalculs.

IV.3.3 Environnement de type industriel

Enfin, l'environnement de type industriel (D) est similaire à celui de type hangar, à la différence que ce dernier est plus grand et fermé (et donc moins directement exposé aux rayonnements lumineux). De la même manière que précédemment, deux types de boucles ont été considérées (Figure 5).

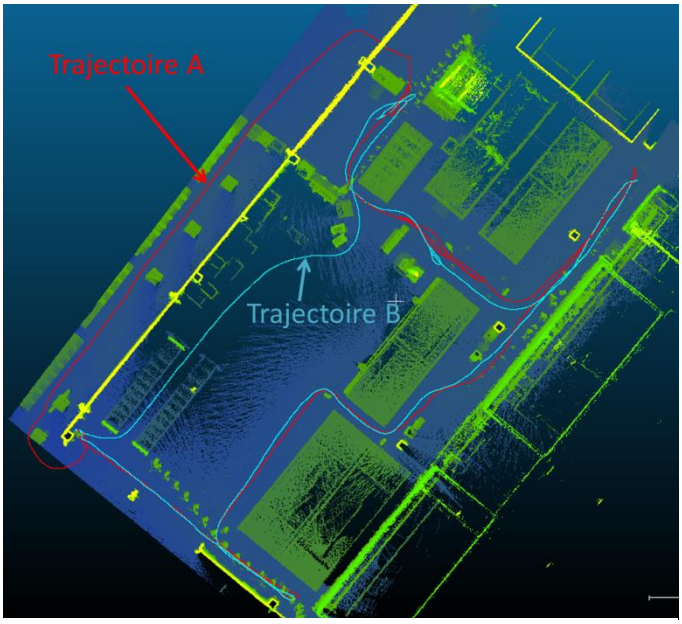


Figure 5 : Modèles de trajectoires effectués en environnement de type industriel

[11] Annexe 5

L'une complètement en intérieur et ayant fait l'objet des tests de répétabilité et de reproductibilité sur la méthodologie de levé (appelée trajectoire B, durée de 3'00'') et une autre incluant une portion de façade extérieure (trajectoire A, durée de 3'50'') et ayant fait l'objet des tests de reproductibilité sur les options de recalcul et de géométrie de levé.

Les résultats (Tableau 5 et 6) sont présentés de la même façon que pour les environnements précédents à la différence que chaque tableau correspond aux tests effectués sur un modèle de trajectoire.

Sur le modèle de trajectoire B (Tableau 5), parmi les tests de reproductibilité de mesure effectués (allure lente, mouvements horizontaux et verticaux), seule la réalisation de mouvements horizontaux ou verticaux permet l'obtention de résultats significatifs en termes d'écarts par rapport au nuage initial. Tous améliorent en revanche le bruit de mesure et seul le levé acquis à allure plus lente améliore la résolution du nuage.

Modèle de trajectoire B	Écarts entre nuages			Bruit		
	NMAD	Incertitude	Q (0.95)	Épaisseur de trait	NMAD	Résolution
Initial	*0.009*	*0.010*	*0.048*	*0.035*	*0.010*	*0.013*
Allure lente	0.008	0.009	0.046	0.030	0.008	0.010
Mouvements :						
• Verticaux	0.012	0.010	0.065	0.032	0.009	0.012
• Horizontaux	0.013	0.010	0.068	0.030	0.009	0.011

Tableau 5 : Synthèse des résultats probants de l'étude de reproductibilité en environnent type industriel sur le modèle de trajectoire B, résultats exprimés en mètre(s)

Pour les levés effectués sur le modèle de trajectoire A (Tableau 6), les tests de répétabilité n'ayant pas été effectués, les valeurs d'écarts entre les nuages ne sont comparables qu'entre les tests eux-mêmes. En revanche, les éléments de nuage permettant le calcul de bruit et de résolution étant les mêmes, les valeurs sont directement opposables à celles trouvées sur les nuages initiaux. Ainsi, tout comme en environnement de type hangar, la réalisation du levé à allure plus lente (durée de 4'20'' contre 3'50'') n'offre pas de résultats significatifs en termes d'écarts entre les nuages mais permet d'améliorer le bruit du nuage. Pour le recalage du levé effectué en 2 boucles, si les deux options testées ne présentent pas les écarts entre nuages les plus importants, le recalage en utilisant la fonction *Merge* de *GeoSLAM Hub* permet une amélioration du bruit.

Cela peut être dû au fait que les deux options de recalages n'offrent pas les mêmes résultats en termes d'altimétrie puisque les éléments extraits pour le calcul sont des éléments de sol. En termes d'options de recalcul, nous pouvons voir que l'option PLC permet, sans apporter les changements les plus significatifs sur le nuage, de diminuer le bruit de ce dernier. Le paramètre *Voxel Density* a les mêmes effets s'il est fixé à 3 mais impacte le nuage de manière complètement opposée (grands écarts par rapport au nuage initial mais le bruit est dégradé) lorsqu'il est fixé à -1. Cela, au contraire de l'environnement de type hangar où la boucle est plus rapide et l'exposition à la luminosité plus importante, permet de corroborer l'hypothèse émise lors de l'étude de l'environnement VEFA. Il est également utile de remarquer que l'option *Rigidity*, fixée à -5, donnant ainsi plus de poids aux données lidar, permet d'impacter significativement le nuage initial mais dégrade, de la même façon que *Voxel Density* à -1, les chiffres de bruit.

Modèle de trajectoire A	Écarts entre nuages			Bruit		
	NMAD	Incertitude	Q (0.95)	Épaisseur de trait	NMAD	Résolution
Initial	-	-	-	*0.035*	*0.010*	*0.013*
Allure lente	0.013	0.009	0.083	0.027	0.008	0.011
Recalage (2 boucles) :						
• Hub	0.025	0.009	0.138	0.029	0.008	0.012
• Données dynamiques	0.026	0.010	0.150	0.034	0.010	0.012
PLC activé	0.024	0.009	0.163	0.025	0.007	0.012
Rigidity (-5)	0.042	0.011	0.173	0.044	0.012	0.014
Voxel Density :						
• -1	0.036	0.012	0.188	0.044	0.012	0.014
• 3	0.020	0.009	0.111	0.025	0.007	0.012

Tableau 6 : Synthèse des résultats probants de l'étude de reproductibilité en environnent type industriel sur le modèle de trajectoire A, résultats exprimés en mètre(s)

Pour l'ensemble des tests en environnement peu favorable au ZEB-Revo RT, il est important de spécifier le fait que l'étude approfondie du paramètre *Window Size* n'as pas été faite, le nuage résultant présentant visuellement de fortes dégradations.

IV.4 Articulation du levé entre les étages

Au-delà de mesurer les impacts de la méthodologie de levé et du recalcul SLAM au sein de différents environnements, une attention particulière a été portée sur l'articulation du levé entre les étages, importante notamment pour la réalisation de coupes. Pour ce faire, deux tests principaux ont été menés. Le premier, déjà explicité lors de l'étude de répétabilité (partie III.2.2) a concerné le levé de deux étages en environnement VEFA (E), en faisant varier la géométrie de levé, et le second, plus succinct, a porté sur le relevé d'une cage d'escalier, en étudiant uniquement les écarts entre nuages en fonction de la géométrie de levé et du paramétrage du recalcul SLAM.

Ainsi, pour le levé des deux étages (environnement E), plusieurs articulations ont été retenues : levé de l'environnement avec une seule boucle, avec deux boucles (chacune couvrant un étage plus l'escalier, servant donc de zone de recouvrement) et avec trois boucles (une boucle par étage plus une boucle uniquement pour l'escalier avec une portion de chaque étage pour assurer le recouvrement). Également, de la même façon que précédemment, plusieurs options de recalage ont été considérées. Les résultats obtenus permettent d'affirmer que le nuage obtenu par combinaison des données dynamiques et statiques (étages relevés au scanner dynamique et escalier obtenu par scanner statique) est celui qui présente le moins de changements par rapport au nuage initial (une seule boucle pour tout le levé). Pour le reste, à la fois en termes d'écarts et de bruit, les résultats sont similaires quel que soit le type de recalage et de géométrie employé.

Pour le relevé de la cage d'escalier, composée de 5 paliers (organisation en demi-étages) et d'un passage de porte, deux géométries ont été étudiées, par le biais d'une et deux boucles (avec recouvrement dans l'escalier). Le but est de s'assurer que les mesures effectuées au ZEB-Revo RT sont fiables dans ce type d'environnement, souvent soumis à des rotations plus importantes. Parmi les différentes méthodes de recalage, il est tout d'abord important de remarquer que, sans doute à cause des formes similaires, l'assemblage par le biais de *GeoSLAM Hub* n'a pas pu aboutir. Aussi, comme précédemment, le levé s'appuyant sur la combinaison des données dynamiques et statiques, présente les changements les plus importants par rapport au nuage initial. En termes de paramétrage du recalcul SLAM, il est possible de remarquer, une nouvelle fois, que les options PLC ainsi que *Voxel Density* (fixée à -1 et 3) sont celles qui présentent le plus de résultats significatifs. À noter que, comme précédemment, l'étude du paramètre *Window Size* n'a pas été approfondie devant les mauvais résultats visuels.

V Qualité de levé

À partir des résultats probants observés, il est maintenant nécessaire d'en étudier la qualité, par le biais d'une étude de justesse et de niveau de détails par rapport à un levé de référence effectué à l'aide du scanner statique *Trimble* TX5.

Selon les données constructeur [33], le *Trimble* TX5 est un scanner statique permettant d'effectuer des mesures entre 0.6 m et 120 m avec une erreur de mesure de ± 0.002 m, tant à 10 que 20 m et sur des objets d'une réflectivité de 10 % ou 90 %. Le bruit de mesure est lui annoncé comme étant de l'ordre de 0.006 m à 10 m et 0.0095 m à 25 m sur une surface ayant une réflectivité de 90 % et de l'ordre de 0.012 m à 10 m et 0.022 m à 25 m pour une réflectivité de 10 %. La résolution angulaire maximale est quant à elle annoncée à 0.009° tant horizontalement que verticalement. Le guide utilisateur [34] apporte lui plus de précision et nous informe que le scanner repose sur la mesure de distante par décalage de phase, et que les paramètres de résolution et de qualité sont réglables. La résolution varie ainsi entre 1/1 et 1/32 et plus cette valeur est élevée, plus la densité de points du nuage est importante. De même, la qualité peut varier entre 2x et 8x et affecte la qualité du scan (plus la valeur est élevée et plus le bruit de mesure est réduit). À titre de comparaison, la taille de l'empreinte laser à 5 m est de 0.004 m (soit près de vingt fois inférieure à celle du ZEB-Revo RT).

Au vu de ses précisions théoriques importantes, notamment devant celle du ZEB-Revo RT, le scanner statique constitue donc notre référence et est considéré comme représentant la réalité terrain lors de cette étude. Pour réaliser ces levés de référence, conformément au guide d'utilisation du scanner interne à l'entreprise [35], la qualité choisie sera de 3x et la résolution de 1/10 ou 1/8 pour les environnements intérieurs. Ces valeurs seront plus importantes pour le relevé dans les environnements à grande surface ou à grand volume et pour les scans extérieurs.

V.1 Justesse de mesure

Pour étudier cette justesse, nous allons analyser les différents résidus obtenus lors du recalage des nuages dynamiques par rapport au nuage statique. Les écarts M3C2 n'ont pas pu être calculés du fait du temps de calcul trop important que cela engendre. En plus de cette étude de résidu, une inspection de la géométrie de levé sera effectuée.

En environnement riche (A), la moyenne des résidus de recalage sur le nuage statique, obtenue avec les nuages initiaux (acquis avec la méthodologie initiale), est de 0.039 m. Parmi les options d'assemblage testées, seule la combinaison entre données issues du ZEB-Revo RT et du *Trimble* TX5 améliore ce résidu (0.026 m). Cependant, ce résultat doit être nuancé par le fait que les données statiques ajoutées sont denses (près de 10 millions de points sur 23 millions au total) et centrées sur le nuage statique, pouvant le faire tendre à la baisse. Les deux autres options d'assemblage étudiées offrent des résultats similaires mais sans amélioration (respectivement 0.039 et 0.041 m). En termes de paramètres de levé, il apparait que seul le nuage réalisé à allure lente améliore les chiffres de résidu avec une valeur de 0.037 m. Parmi les options de recalcul, il est possible de voir que la majorité dégradent très légèrement le résidu de recalage avec des valeurs de 0.040 et 0.041 m et seule l'option PLC permet de diminuer cette valeur à 0.037m.

Les inspections de la géométrie des nuages ont ensuite permis de constater les écarts aux extrémités du levé. Il apparait ainsi que ces derniers semblent similaires entre les différentes méthodologies de levé (de l'ordre de 0.05m), ce qui n'est pas le cas pour les différents modes de recalage testés, puisque si en effectuant deux boucles, l'assemblage couplant les données dynamique et statique semble être celui avec le moins de déformations (inférieures à 0.02 m), ces dernières sont plus importantes avec l'utilisation de 3 boucles (entre 0.05 et 0.10 m). Entre le recalage par le biais du logiciel *GeoSLAM Hub* et celui n'utilisant que les données du scanner dynamique, les décalages constatés sont similaires (de l'ordre de 0.03 m). En termes de méthodologie de traitement, l'option d'export *Smooth* montre très clairement de mauvais résultats avec notamment le fait qu'entre les deux arrêtes d'une même cloison, des points parasites apparaissent. L'option *Rigidity*, fixée à -5, offre elle aussi de mauvais résultats avec des écarts aux extrémités du levé plus importants que la méthodologie initial, contrairement aux options PLC et *Voxel Density* (fixée à -1) qui tendent à les réduire (autour de 0.03 m).

En parallèle à l'ensemble de ces tests, et seulement au sein de l'environnement riche (A), d'autres options de recalcul ont été testées. L'option *Modify Bounding Box*, permettant de modifier la taille prédéfinie de la boite d'exclusion (boîte centrée sur la tête du scanner dans laquelle les points sont ignorés, notamment pour éliminer toute trace de l'opérateur dans le nuage) a ainsi été testée. Ces tests ont portés sur sa suppression complète et sur la modification de sa taille de sorte qu'elle n'élimine que les points situés derrière le scanner.

Les résultats montrent que les dimensions initiales de cette boite éliminent de nombreux points, mais qu'en supprimant ou modifiant la taille de cette dernière, cela provoque l'apparition de points parasites (trace de l'opérateur le long de la trajectoire effectuée). Sur les deux paramétrages ainsi testés, aucun n'améliore les chiffres de bruit et seule la suppression complète de cette boîte impacte le nuage initial mais dégrade fortement le résidu de recalage sur le nuage statique (0.157 m). Également, l'option *Large Range Filter Scope*, permettant de ne pas ignorer les points considérés par le logiciel comme ne faisant pas partie intégrante d'une surface continue (effet de bord) a été testée. Les résultats nous montrent que cette option n'apporte aucun bénéfice en termes de bruit. Aussi le nuage présente des écarts non significatifs par rapport au nuage initial mais le résidu de recalage sur le nuage statique est en revanche réduit, de la même façon que le levé à allure lente (0.038 m).

Au sein de l'environnement de type VEFA (B), on constate qu'aucune méthodologie de levé ne permet d'améliorer le résidu initial (0.040 m), mais qu'au contraire, les nuages relevés avec une surabondance d'amers et en effectuant des mouvements horizontaux dégradent ces derniers (respectivement 0.044 et 0.046 m). Au sujet des paramètres de traitement, tous dégradent très légèrement le résidu initial (0.041 m voir 0.042 m pour *Voxel Density* à -1), y compris l'option PLC. En ce qui concerne l'inspection visuelle des nuages, aucun nuage ne semble améliorer le nuage acquis par méthodologie initiale (centré sur la référence). L'ensemble de ces observations confirment le fait que les résultats observés sont bien moins significatifs.

En environnement de type hangar (C), pour les boucles effectuées selon le modèle de trajectoire B, on constate que tous les tests ont améliorés les résidus du nuage acquis dans les conditions initiales (0.063 m), de manière plus marquée pour le levé effectué avec des mouvements horizontaux (0.052 m). Il est important de souligner que les résidus de recalage sur les nuages de répétabilité (0.086 m) sont bien supérieurs à celui du nuage initial, pourtant acquis dans les mêmes conditions. Cela peut être dû au fait que les tests de répétabilité ont été effectués à un moment où la luminosité était plus forte, pouvant donc signifier que l'exposition à une plus forte luminosité dégrade les performances du scanner. Pour les boucles effectuées selon le modèle de trajectoire A, aucun paramètre de traitement ne permet d'améliorer les résidus de recalage du nuage initial (0.143 m) mais on peut constater que le paramètre *Convergence Threshold* (fixé à 5) dégrade légèrement ce dernier (0.146 m), au contraire du levé à allure lente (le réduisant à 0.135 m).

Lors de l'inspection visuelle des nuages, il a été possible de déceler des problèmes de géométrie, plus précisément de superposition d'éléments identiques (les parois du bâtiment, scannées sur leurs deux faces, peuvent ainsi se retrouver dupliquées). Il s'avère ainsi que sur les levés effectués à partir du modèle de trajectoire A, le fait de recalculer la boucle, peut localement créer ce phénomène là où il n'est pas présent dans le nuage initial. Seul les paramètres *Rigidity* (à -5) et *Voxel Density* (à 3), ainsi que le levé à allure lente ne recréent pas ce phénomène, ces deux derniers semblant même améliorer le levé initial (Figure 6). Sur les levés suivant le modèle de trajectoire B, le problème est aussi présent et est corrigé par la réalisation de mouvements horizontaux ou verticaux.

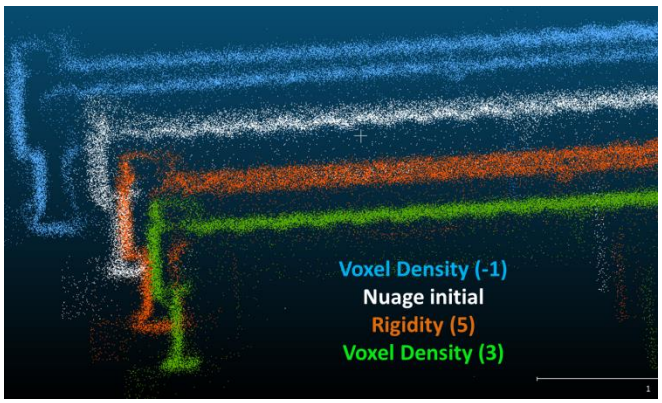


Figure 6 : Illustrations du problème de géométrie rencontré en environnement de type hangar

En environnement de type industriel (D), contrairement à ce que nous avons pu remarquer en environnement type hangar, les résidus issus des nuages de répétabilité (0.075 m) sont inférieurs à celui observé sur le nuage initial (0.091 m). Cela peut également être dû à la luminosité puisque les nuages de répétabilité étaient soumis à moins de luminosité. Parmi les tests méthodologiques réalisés sur le levé suivant le modèle de trajectoire B, aucun n'apporte de changement significatif. Les tests de paramétrage de recalculs SLAM, menés sur le modèle de trajectoire A ne montrent pas non plus d'amélioration significative des résultats mais les nuages obtenus par l'emploi de *Rigidity* (à -5) et de *Voxel Density* (à -1) donnent les moins bonnes valeurs de résidu (0.167 contre 0.162 m pour le nuage initial). En revanche, tout comme en environnement de type hangar, le levé à allure lente, sur le modèle de trajectoire A offre un résidu plus faible (0.149 m). Ce dernier reste tout de même bien supérieur aux chiffres obtenus avec la réalisation de deux boucles (respectivement 0.116 m pour un assemblage avec *GeoSLAM Hub* et 0.120 m avec *Realworks*, en n'utilisant pas les données statique pour l'assemblage), qu'il faut malgré tout nuancer avec le fait que la trajectoire alors effectuée couvre de manière bien plus importante certaines parties du bâtiment. L'inspection visuelle, portant sur les mêmes problèmes de géométrie que pour l'environnement de type hangar, n'est en revanche faite que sur les nuages obtenus depuis le modèle de trajectoire A.

On peut ainsi remarquer que par rapport au nuage initial, les paramètres de levé à allure lente et en réalisant 2 boucles, recalées avec *Realworks*, améliorent les problèmes de géométrie mais que ces derniers ne sont vraiment résolus que par le biais de l'emploi des options de retraitement. En effet, si l'option *Voxel Density* permet une légère amélioration, les options PLC, *Convergence Threshold* (à 5) et *Rigidity* (à -5) permettent de faire disparaitre ces problèmes.

Enfin, les tests menés sur l'articulation du levé nous montrent que, pour le levé portant sur deux étages (environnement E), aucune géométrie autre que le levé par le biais d'un seul nuage ne permet d'améliorer le résidu, mis à part la combinaison des données dynamique et statique, avec cependant la même retenue que précédemment. Les inspections géométriques effectuées confirment ces résultats mais notent tout de même, vis-à-vis du nuage statique servant de référence, une légère rotation de l'étage (de l'ordre de 0.04 à 0.05 m pour le nuage initial et supérieure à 0.05 m sinon). Il faut cependant rester méfiant vis-à-vis de ces résultats car les surfaces des étages relevés ne sont pas très importantes (respectivement 175 m² au rez-de-chaussée et 65 m² à l'étage), ce qui ne permet pas de grandes surfaces de recouvrement. Aussi, en remarquant de manière plus fine que le fait d'effectuer une boucle par étage en les recalant grâce à une troisième effectuée dans l'escalier et comportant une portion de chaque étage (résidu de 0.037 m avec *Hub* et 0.038 m par *Realworks*) est plus bénéfique que la réalisation de deux boucles, chacune comprenant un étage plus l'escalier (résidu de 0.039 m avec *Hub* et 0.048 m par *Realworks*), cela peut vouloir dire qu'il est préférable de recaler les nuages sur des portions de levé du même niveau.

À ce propos, il s'avère que les résultats issus du relevé de l'escalier montrent un résidu de recalage inférieur pour un relevé en deux parties (0.033 m) plutôt qu'en une seule (0.043). Aussi, par rapport au nuage sur lequel les recalculs ont été effectués, seule l'option PLC permet de d'améliorer les résultats (0.038 m) mais ce dernier reste inférieur à l'utilisation de deux boucles.

V.2 Niveau de détails

Au-delà de la géométrie du nuage, comme nous l'avons précédemment expliqué, il est important de s'intéresser au niveau de détails observable au sein de chaque nuage. À ce sujet, il est utile de remarquer que, contrairement à la géométrie de levé qui peut être sujette, entre autres, aux phénomènes de dérive, le niveau de détail est indépendant de la durée de la boucle.

Tout d'abord, il est possible de remarquer que devant le bruit important des nuages de points issus des levés effectués, les différences d'un nuage à un autre sont minimes. L'accent a donc été porté sur les limites de modélisation plus que sur la précision de cette dernière. Après une rapide inspection visuelle, les meilleurs nuages de chaque environnement ont donc été retenus pour être comparés au nuage statique sur des éléments de détails. Pour rappel le niveau de détails du nuage initial est de l'ordre de 0.035 m.

En environnement riche (A), en plus d'une coupe horizontale classique, une coupe verticale intérieure et une coupe du plafond ont été réalisées. Il s'avère ainsi que, même si le niveau de détails est le même entre tous les nuages, le nuage acquis en réduisant la distance scanner – objet est celui sur lequel les formes sont le plus remarquables. Cela nous indique donc de manière logique qu'au-delà de la méthodologie de levé ou de traitement, les lignes de visées effectuées avec le scanner sont très importantes. Il est également important de noter qu'en supprimant la boite d'élimination des points (paramètre *Modify Bounding Box*), le nombre de points du nuage est plus important, y compris sur les éléments de détails, mais le niveau de détails ne s'en trouve pas amélioré. Aussi, l'option *Smooth* dégrade de manière très importante ce dernier. Ainsi, sur les éléments comparés, étant à la fois des éléments ponctuels (déclencheur manuel d'incendie et affichage de plan de secours) et de plus grandes tailles (passage de portes et goulottes électriques verticales), il est possible de remarquer que sur la coupe horizontale effectuée, les éléments ponctuels sont très difficilement distinguables, notamment dû au fait que peu de points constituent ces derniers. Ce constat est appuyé par le fait que, parmi des cubes de tailles connues disposés au sein du levé (Figure 7), le dessin ne peut être effectué qu'à partir de 0.05 m, sans pour autant pouvoir garantir la précision de ce dernier. Les éléments de plus grandes tailles, plus visibles car remarquables au sein nuage, permettent l'observation des mêmes résultats, à savoir que bien qu'ils soient visibles, les détails de ces éléments ne peuvent être clairement distingués. Ainsi, pour les plans d'étage, le niveau de détails pouvant être modélisé est de l'ordre de 0.05 m. Une attention particulière doit tout de même être portée sur les éléments ponctuels compte tenu du faible nombre de points acquis sur ces derniers.



Figure 7 : Cubes de tailles connues disposés au sein du levé

Sur la coupe verticale intérieure, il est possible de remarquer que le niveau de détail est très faible. En effet, compte tenu du fait que le ZEB-Revo RT ne permet pas de capter d'intensité, l'export d'une orthophoto doit être fait avec une colorisation des points en fonction de leur profondeur par rapport à la coupe effectuée (appelée par élévation) pour une meilleure appréciation. Cela limite donc le niveau de détails à la différence de profondeur des éléments puisque l'ensemble des éléments situés sur un même plan ne sont alors pas ou très difficilement distinguables. Par exemple, dans le cas présent, les fenêtres étant munies de stores vénitiens, il est impossible de distinguer l'ouvrant du dormant. De plus, les traces de rotation du profilomètre sont visibles et forment des zones où les points sont beaucoup plus nombreux, posant un problème supplémentaire de visibilité. De la même façon, pour les éléments de plafond, on remarque qu'il est possible de dessiner les éclairages principaux (ici des dalles de plafonds dans lesquelles sont incrustés des néons), sans doute grâce au fait qu'ils créent un décalage d'élévation. À noter que pour le dessin de spots lumineux, d'un diamètre de 0.1 m, leur dessin est plus compliqué puisque qu'il faut prêter une grande attention pour pouvoir les distinguer, y compris en colorisant l'orthophoto en fonction de l'élévation. Il est donc possible d'emmètre l'hypothèse selon laquelle le niveau de détails sur les coupes, telles que représentant une surface sur laquelle des éléments doivent être dessinés, est limité par le bruit et que tous les éléments dont la différence d'élévation par rapport à la surface sur laquelle ils reposent n'y serait pas supérieure ne sont pas modélisables.

En environnement de type VEFA (B et E), les mêmes constations que celles ici effectuées à propos du niveau de détails sur les plans de niveau peuvent être faites.

En environnement de type hangar (C) ou industriel (D), les coupes de façades réalisées permettre d'étayer l'hypothèse émise selon laquelle le niveau de détails des éléments à représenter sur une surface est limité par le bruit et de remarquer que le ZEB-Revo RT n'est donc pas utilisable pour la réalisation de plans de façades. En effet sur les orthophotos de façades générées, l'ondulation de la paroi (d'une profondeur de 0.03 m et d'une largeur de la même taille) n'est pas visible, y compris en générant une colorisation fonction de l'élévation. Pour un dessin en plan, il est en revanche possible de clairement voir cette ondulation. Ainsi, étant donné qu'au sein des environnements riche et VEFA, toutes les tailles d'éléments n'étaient pas présentes, il est possible d'affirmer que pour les éléments de grandes tailles, le niveau de détails est limité par le bruit et donc de l'ordre de 0.035 m.

V.3 Conclusion(s) méthodologique

De manière générale, au travers l'ensemble des tests effectués, nous avons pu remarquer que les changements portant sur la méthodologie de levé sont plus impactants que ceux portant sur les paramètres de recalcul de boucle. Cependant, il apparait que tous ne sont pas tout le temps bénéfiques au nuage.

Ainsi, il s'avère que l'ajout d'amers au sein d'un nuage n'as d'intérêt que si l'environnement est vide de tout amers (tel que les environnements de type VEFA) et que ces derniers sont placés de manière raisonnable (un par pièce par exemple). Malgré tout, leurs placements étant tout de même contraignant (il faut disposer d'amers de taille conséquente et pouvoir les placer au sein du levé) et leur apport limité devant les autres variations de méthodologie, cette option n'est pas retenue. Les options de levé à allure plus lente et de réalisation de mouvements sont en revanche plus bénéfiques et moins contraignantes à mettre en œuvre lors du levé. Ces deux options constituent donc les changements apportés à la méthodologie initiale, en sachant que les mouvements à effectuer avec la tête du scanner dépendent de l'environnement dans lequel le scanner évolue. Ainsi, si au sein de petits espaces, tels que les couloirs par exemple, ces derniers sont difficilement réalisables, et que dans des environnements constitués de grands volumes et/ou grandes surfaces (tels que les environnements de type hangar ou industriel), ils sont inutiles, il s'avère que dans les pièces de hauteurs sous plafond modérées (entre 2 et 4 m), il est utile de réaliser des mouvements horizontaux. Il est donc possible d'émettre l'hypothèse selon laquelle ces mouvements doivent être effectués si les visées vers lesquelles le scanner est orienté sont inférieures à 5 m. Aussi, dans le but de pouvoir mieux dessiner et potentiellement pouvoir améliorer le niveau de détails, notamment sur les éléments ponctuels, il faut prendre garde aux lignes de visées effectuées et donc orienter le scanner vers les éléments à représenter.

Lorsque plusieurs boucles doivent être effectuées, il n'apparaît pas de différence entre un assemblage par le biais de *GeoSLAM Hub* ou par nuage-nuage à l'aide de *Realworks* si ces derniers concernent un seul et même étage. Pour le levé de plusieurs étages, l'assemblage offrant la meilleure précision semble être par le biais de zone de recouvrement sur un seul niveau plutôt que par le biais d'escalier. Malgré tout, les levés n'ont ici pas été effectués sur de larges emprises et ces assertions seront donc vérifiées par la suite (partie VI.2).

En termes de paramètres de traitement, il faut tout de même remarquer que, malgré leurs impacts limités, ces derniers permettent de corriger des problèmes importants de géométrie. Seuls les paramètres PLC et *Voxel Density* semblent pouvoir avoir un effet positif sur un nuage correctement généré. Malgré tout, il faut prendre garde dans la manipulation du paramètre *Voxel Density* puisqu'un mauvais réglage de ce dernier tend vers une dégradation du nuage. Ainsi, au sein d'environnements riches, un réglage à -1 (découpage en plus grands *voxels*) est préconisé (rejoignant les constatations faites par Jean-Baptiste Gherissi [25]) alors qu'en environnements plus pauvres (de type VEFA, hangar ou industriel), un réglage à 3 (utilisation de plus petits *voxels*) semble améliorer le nuage. Par rapport à ce que nous avons vu lors de l'étude des travaux connexes (partie II.2.2), nous pouvons voir que les effets positifs du paramètre *Window Size* ne peuvent pas être confirmés car n'apportent pas de gains significatifs par rapport au nuage initial, au même titre que la priorisation des données de la centrale inertielle (paramètre *Rigidity*).

VI Mise en application de la méthodologie retenue

Il convient dorénavant de vérifier que ces changements, apportés à la chaîne de traitement et d'acquisition, permettent l'obtention d'un réel gain en termes de précision relative ou de niveau de détails, sans pour autant affecter la productivité des travaux, c'est-à-dire sans rallonger de manière significative les temps d'acquisition ou de traitement. Pour ce faire, nous allons, de la même façon que précédemment, étudier la répétabilité et la justesse des levés. Initialement prévu au sein d'un seul et unique environnement, en raison de difficultés techniques, ce test a finalement été conduit au sein de deux environnements : le même environnement riche que celui jusqu'à alors utilisé et un environnement VEFA de taille plus importante et nécessitant plusieurs boucles.

VI.1 A petite échelle

Cette première étude s'intéresse donc à une seule boucle, réalisée au sein des bureaux de l'entreprise, nous permettant d'opposer de manière directe les résultats avec ceux issus de la méthodologie initiale. Aussi, en plus d'étudier un levé effectué avec la nouvelle méthodologie, deux autres levés seront étudiés, l'un n'étant pas recalculé avec *GeoSLAM Hub* et l'autre recalculé avec de nombreux paramètres non retenus (PLC, *Voxel Density* à -1, *Rigidity* à -5 et *Convergence Threshold* à 5), afin de constater le réel impact de ces derniers.

Également, et seulement sur la base de la nouvelle méthodologie, des tests de répétabilité ont été effectués, dans le but, comme précédemment, de s'assurer que la méthodologie soit répétable mais aussi de fixer un seuil d'irreproductibilité. Ces tests de répétabilité ont été effectués au travers 5 boucles (1 boucle de référence et 4 autres boucles acquises dans les mêmes conditions). Ces derniers ont également permis de quantifier les changements apportés à la méthodologie afin que cette dernière puisse être reconduite. Ainsi, la vitesse avec laquelle le levé a été effectué est de l'ordre de 3'20'' / 100 m² (environ 1,5 km/h) et l'oscillation horizontale de la tête du scanner est faite de sorte à ce que, lorsque l'on relève une pièce, le scanner soit successivement orienté vers les deux murs parallèles à l'avancement de l'opérateur. Il est aussi important de noter que, pour la même emprise de levé, la durée de la boucle acquise par le biais de la nouvelle méthodologie est de 8'30'' (contre 7'00'') et que le temps de recalcul est du même ordre de grandeur que le temps d'acquisition (hors décompression du fichier par le logiciel).

	Écarts entre nuages			Bruit		
	NMAD	Incertitude	Q(0.95)	Épaisseur de trait	NMAD	Résolution
Initial	-	-	-	*0.029*	*0.008*	*0.008*
Finale	0.011	0.003	0.058	0.030	0.008	0.007
Sans traitement	0.013	0.003	0.058	0.028	0.008	0.007
Traitement complet	0.003	0.003	0.012	0.028	0.008	0.007

Tableau 7 : Synthèse des résultats de l'étude de la nouvelle méthodologie et de variantes à petite échelle, résultats annoncés en mètres

La présentation des résultats (Tableau 7) est telle que les colonnes ont les mêmes significations que celles des tableaux précédents. La ligne '*Initial*' correspond ici au nuage acquis avec la méthodologie initiale et la ligne '*Finale*' correspond aux moyennes calculées à partir, soit de l'ensemble des 5 nuages pour les colonnes de bruit et résolution, soit des écarts entre les nuages de répétabilité et le nuage de référence pour les colonnes de résidu et d'écarts. Les lignes '*Sans traitement*' et '*Traitement complet*' correspondent respectivement aux tests effectués en ne recalculant pas la boucle de levé et en utilisant l'ensemble des paramètres possibles ne nuisant pas au traitement (ici, pour une durée de recalcul de presque 1.5 fois la durée d'acquisition).

Ces résultats nous montrent que si en termes de bruit et de résolution, les changements ne sont pas significatifs (bruit de 0.03 m), en termes d'écarts en revanche, le fait de ne pas procéder au recalcul semble impacter le nuage. Malgré tout, l'utilisation de nombreux paramètres de traitement n'as pas de changement significatif par rapport au nuage retraité avec les paramètres définis sur la nouvelle méthodologie (ici PLC et *Voxel Density* à -1). Cela étaye nos dires précédents selon lesquels, seuls ces deux derniers paramètres influent sur le nuage.

Les études de justesse de mesure ont ici été approfondies par rapport aux tests précédemment menés et ont portés sur les nuages acquis par le biais de la méthodologie initiale et finale (avec et sans retraitement pour cette dernière). Les écarts entre ces nuages et le nuage statique, constituant notre référence, ont donc été calculés par le biais de la fonction M3C2 et des comparaisons de côtes locales (au sein de mêmes pièces), globales (à l'échelle de tout le levé) et de surfaces ont été faites à partir des plans et coupes digitalisés (un plan de niveau et une coupe intérieure)[12]. Les écarts obtenus par le biais de la fonction M3C2 ainsi calculés montrent que la méthodologie finale, avec ou sans traitement, semble plus juste que la méthodologie initiale, de manière tout de même plus marquée, pour le nuage non recalculé (NMAD respectivement égales à 0.014 et 0.008 m contre 0.019 m, avec des incertitudes similaires). Les résultats de la comparaison de cotes et de surfaces (Tableau 8) sont présentés de la même façon que précédemment et le nombre de cotes ou de surfaces comparées est indiqué entre crochet.

Méthodologie	Comparaison au scanner statique		
	Surfaces	Cotes (plan)	Cotes (coupes)
Initiale	- 0.38 % [8]	- 0.11 % [31] 0.02 % [6]	- 0.02 % [12] 0.24 % [5]
Finale	- 0.36 % [8]	- 0.15 % [31] - 0.04 % [6]	- 0.32 % [12] 0.07 % [5]
Sans traitement	- 0.44 % [8]	- 0.15 % [31] - 0.02 % [6]	- 0.20 % [12] 0.07 % [5]

Tableau 8 : Synthèse des résultats de la comparaison de surfaces et de cotes effectuées sur les méthodologies initiale et finale à petite échelle

[12] Annexe 6 et 7

Ces derniers permettent de mettre en évidence, tout comme l'ont montré les travaux connexes (partie II.2.2), le fait que la méthodologie initiale est amplement suffisante pour la réalisation de plans de surfaces. En effet, par rapport aux surfaces mesurées par le biais du scanner statique, les écarts sont de -0.38 % pour la méthodologie initiale (soit une erreur moyenne de 0.38 m² pour 100 m² mesurés dans une même pièce). La méthodologie finale, avec ou sans traitement, ne permet pas d'améliorer de manière significative ces résultats. À titre informatif, il est possible de noter que les plus grands écarts sont présents sur les plus petites pièces (< 10 m²). En termes de comparaison de cotes sur le plan digitalisé (la première ligne correspond aux cotes locales et la seconde aux cotes globales), il est possible de remarquer que si à échelle globale (à l'échelle du chantier), la méthodologie instaurée ne permet d'améliorer les résultats, ces derniers sont légèrement dégradés à l'échelle locale (au sein de pièces). Malgré tout, ces résultats restent justes puisque, dans le cas des plus grands écarts observés, ici ± 0.15%, cela représente une erreur de mesure de ± 0.0015 m/m, soit un chiffre inférieur à ce qu'avance le constructeur (± 0,03 m pour des objets vus entre 0,1 et 10 m). La comparaison des cotes sur la coupe réalisée montrent en revanche des résultats plus significatifs. On peut en effet constater une forte dégradation des mesures à échelle locale, de manière plus marquée pour le nuage issu du recalcul de boucle. À l'échelle globale en revanche, il est possible de remarquer une amélioration des cotes mesurées, notamment due au fait que le problème de rotation des pièces les unes par rapport aux autres, constaté sur la méthodologie initiale, est en grande partie résolu (visuellement de manière tout de même plus marquée après recalcul de la boucle).

En termes de niveau de détails, il est possible de remarquer que, comme nous l'avions précédemment vu, la différence entre les nuages est faible, bien qu'il est possible de voir que les formes sont plus facilement visibles du fait de l'attention portée aux lignes de visées et à l'allure lente réalisée, permettant l'acquisition de plus de points.

Il est ainsi possible d'affirmer que la méthodologie mise en place, tant sur la phase d'acquisition que de traitement ne permet pas d'apporter plus de précision ni d'accroitre le niveau de détails. En revanche, cette dernière, notamment par le biais de la méthodologie de levé, permet de minimiser les erreurs de géométrie du nuage acquis.

Ainsi, au sein d'une seule boucle, un levé effectué au ZEB-Revo RT permet d'obtenir un niveau de détails égal au bruit (0.03 m, mais limité à 0.05 m pour les éléments ponctuels), estimé à partir de la moyenne des résultats de répétabilité. En prenant en compte la précision intrinsèque des mesures (0.014 m), obtenue par le biais des tests de répétabilité effectués ($NMAD \pm Incertitude = 0.011 + 0.003$) mais aussi de l'erreur de mesure moyenne (justesse) sur les cotes mesurées (± 0.0015 m/m, soit à une distance de 5 m, ± 0.008 m), la précision relative du ZEB-Revo RT peut donc être estimée, avec la formule de propagation de l'erreur, à 0.016 m ($\sqrt{répétabilité^2 + justesse^2} = \sqrt{0.014^2 + 0.008^2}$).

VI.2 Articulation de la géométrie de levé

Au-delà d'un seul nuage, nous nous sommes également intéressés à la géométrie de levé (articulation de plusieurs boucles). Pour des raisons de temps, ce test (Figure 8) ne porte ici que sur un seul étage (et de manière partielle), le relevé sur deux étages (ou de la totalité du niveau) n'ayant pas été réalisé avec le scanner statique pour avoir un nuage de comparaison.

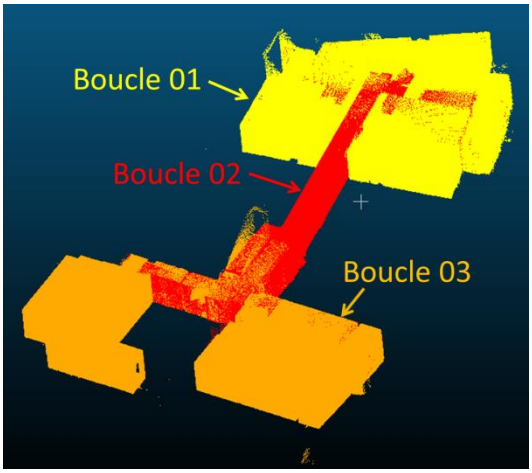


Figure 8 : Géométrie de levé réalisée lors de l'étude d'articulation de la méthodologie finale

L'environnement de levé étant un environnement de type VEFA, le levé a été effectué à allure lente et en effectuant des mouvements horizontaux et la boucle obtenue a été recalculée avec l'option PLC (l'option *Voxel Density* fixée à 3 aurait également dû être utilisée mais ne l'as pas été à cause d'une mauvaise première interprétation des résultats). Aussi, des amers étaient ponctuellement présents (par le biais de stocks de matériel).

Lors de l'acquisition, il a été remarqué qu'en plus de ne pas devoir réaliser les mouvements horizontaux dans le couloir, le fait de lever ce dernier à allure lente est difficile puisque le signal lumineux indiquant la qualité de levé passe rapidement au rouge. Le couloir a donc été relevé par le biais de la méthodologie initiale mais recalculé, au même titre que les autres nuages, avec l'option PLC. Aussi comme le prévoit la méthodologie initiale, afin de garantir autant que possible le recouvrement, le levé du couloir comporte quelques entrés d'appartements. L'emprise du levé est de 410 m², les boucles effectuées sont respectivement de 7'30'' pour 195 m² (soit 3'50'' / 100 m²), 5'32'' pour 155 m² (3'35'' / 100 m²) et dans le couloir, de 3'50'' pour 60 m² (6'20'' / 100 m²).

Pour cette étude, seule une comparaison de cotes à l'échelle du levé, à partir d'une coupe en plan a été réalisée[13] puisque le niveau de détails et la justesse de mesure de surfaces sont les mêmes qu'au sein d'une seule boucle. Cette comparaison de cotes a donc été effectuée entre le nuage statique (servant de référence) et les nuages acquis par le biais de la méthodologie finale (comme précédemment avec et sans retraitement), assemblés par le biais de *Realworks*. Les résultats de cette comparaison nous indiquent que les écarts sont inférieurs pour le nuage obtenu à partir des boucles non recalculées, mais que ces derniers restent tout de même faibles (respectivement ± 0.09 % et ± 0.02 %).

Aussi, comme précédemment abordé, un test a également porté sur la différence entre le recalage par le biais de *Realworks* et de *GeoSLAM Hub*. Pour ce faire, les mêmes cotes ont été mesurées et les écarts entre les deux nuages assemblés ont été calculés par le biais de l'option M3C2. Les nuages n'ont pas été levés avec la méthodologie finale et ont une emprise plus grande puisque concernent la totalité de l'étage au travers 5 boucles (une boucle effectuée dans le couloir en relevant les entrées de certains appartements et 4 autres concernant le levé des appartements). Aussi, cette comparaison n'as portée que sur le recalage planimétrique, sans porter attention à d'éventuelles différences altimétrique puisque le nuage statique n'est pas de la même emprise. Comme précédemment, les résultats de la comparaison de cotes nous indiquent une faible différence et des résultats juste (écarts respectivement égaux à ± 0.06 % et ± 0.10 % pour un recalage avec *Realworks* et *GeoSLAM Hub*). Au-delà de cette comparaison, en générant les rapports de recalage depuis *Realworks*, on remarque que les erreurs nuage à nuage sont similaires (respectivement 0.023 et 0.021 m pour les erreurs totale). Ces rapports sont générés par *Realworks* à partir de nuages assemblés (ici le nuage préalablement assemblé par correspondance nuage – nuage et les boucles assemblées avec *GeoSLAM Hub* puis importées) et en calculant les écarts entre des plans identifiés comme correspondants. Également, afin d'être aussi exhaustif que possible, les écarts M3C2 ont été calculés entre ces deux nuages et ces derniers confirment le fait qu'il y a peu de différence entre ces deux assemblages avec une valeur NMAD + Incertitude égale à 0.012 m.

[13] Annexe 8

Il est donc possible de voir que, pour le recalage de boucles sur un seul niveau, les assemblages par le biais de *Realworks* ou de *GeoSLAM Hub* présentent les mêmes résultats. Malgré tout, il convient de remarquer que l'emploi de la fonction *Merge* de *Hub* est plus rapide mais ne génère pas de rapport d'erreurs, les boucles recalées sont ainsi individuellement sauvegardées et doivent être importées sur *Realworks* pour visuellement vérifier que l'assemblage est correct et générer un rapport de recalage. Lorsque l'assemblage des boucles porte sur plusieurs étages, il convient en revanche d'utiliser *Realworks* puisque la manipulation des nuages sur plusieurs étages y est plus simple.

Il nous est donc possible de confirmer la valeur de précision relative précédemment avancée (0.016 m), au travers plusieurs boucles successives, quel que soit le mode de recalage employé et avec ou sans recalcul des boucles.

Conclusion

Après avoir remarqué que les plans architecturaux exigent une précision relative et un niveau de détails importants, l'étude s'est ensuite orientée, par le biais des tests de reproductibilité et de justesse de mesure, vers l'optimisation de la chaine d'acquisition et de traitement du ZEB-Revo RT avant de mettre à l'épreuve cette dernière.

Nous avons ainsi constaté que les paramètres jouant sur la méthodologie de levé, et plus particulièrement le fait d'effectuer le levé à allure plus lente et de réaliser des mouvements horizontaux au sein d'environnements de type habitation, sont ceux qui permettent d'impacter le plus le nuage. Aussi, nous avons pu constater que parmi les options de retraitement proposées par le logiciel Hub, seules les options *Prioritize Laser Constraints* et *Voxel Density* permettent d'impacter significativement le nuage de points.

Cependant, lors de la mise en application de ces constatations, il s'est avéré que pour la création de plans, la précision relative n'est pas améliorée. En revanche, par le biais de la réalisation d'une coupe intérieure, nous avons pu voir que les changements apportés à la chaine d'acquisition permettent de minimiser les erreurs de géométrie pouvant survenir dans le levé, tout comme ceux apportés à la chaine de traitement qui malgré tout, en plus d'un temps de traitement plus conséquent, dégradent les résultats locaux. Cela confirme le fait que les paramètres de recalcul de boucle proposés par le biais de *GeoSLAM Hub* ne sont utiles que pour la correction de grandes incohérences géométriques. Aussi, en termes de niveau de détails et de bruit de mesure, aucun gain n'a pu être apporté par la méthodologie mise en place.

Au travers l'étude de la géométrie de levé, nous avons également pu constater que, pour des levés pouvant être effectués en moins 10 minutes, il était inutile de multiplier le nombre de boucles. En revanche, si plusieurs boucles sont nécessaires, nous avons pu voir que peu importe le mode de recalage effectué, cela ne dégrade pas la précision relative observée sur une seule boucle. Aussi, lorsque le levé nécessite de réaliser plusieurs boucles sur différents étages, il s'avère que le fait d'effectuer des zones de recouvrement sur le même étage donne de meilleurs résultats.

Ainsi, en remarquant que les mesures effectuées au ZEB-Revo RT sont répétables avec une précision de 0.014 m et que le bruit constitue une limite en termes de niveau de détails et non de précision, nous pouvons estimer que ce scanner permet la réalisation de levés avec une précision relative de 0.016 m, insuffisante pour la réalisation de plans architecturaux à grandes échelles (telles que 1/50 ou 1/100). Aussi, les levés effectués ne permettent la visualisation d'un niveau détails que du même ordre de grandeur que le bruit c'est-à-dire autour de 0.03 m (tout en restant limité à 0.05 m pour les éléments ponctuels).

L'ensemble de ces tests a permis de montrer qu'il est difficile d'améliorer les performances du ZEB-Revo RT puisque ce dernier s'avère limité par l'emploi de technologies (notamment pour le capteur lidar) de précision limitée, comme le laissait penser l'étude des travaux connexes (partie II.2). Il semble, malgré tout, qu'à l'heure actuelle, cela soit le cas sur l'ensemble des scanners dynamiques à main reposant sur la technologie SLAM.

Cela nous permet donc de nous questionner sur l'évolution de ces appareils et notamment sur les limites physiques rencontrées, puisqu'en parallèle, les levés effectués à l'aide de scanners statiques, offrant des niveaux de précision (tant absolue que relative) et de détails bien supérieurs, voient leur chaine de traitement réduite, avec notamment un assemblage pouvant être réalisé de manière simultanée au levé, mais restent limités avec des temps acquisition pouvant être jusque 10 fois supérieurs à ceux de scanners dynamiques. Est-il donc possible, sans que cela ne soit contraignant en termes de temps ou d'un point de vue financier, d'utiliser des instruments, et notamment un capteur lidar, de plus grande qualité, ou est-ce que leur emploi poserait de telles contraintes que le levé ne serait alors plus avantageux ?

Bibliographie

[1] BERGÉ G. *Analyse de la dérive d'un scanner dynamique, le ZEB-Revo RT*. Mémoire présenté en vue d'obtenir le diplôme d'ingénieur CNAM, spécialité géomètre et topographe : ESGT, 2019, 63 pages

[2] JCGM 2012 (2012). *Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés*. Bureau international des poids et mesures, 91 pages

[3] GeoSLAM. *Laser scanning accuracy*, [en ligne]. Disponible sur : <https://GeoSLAM.com/blog/2016/05/31/laser-scanning-accuracy/>. (consulté le 28/02/2020)

[4] GRANGE C., VILLEMIN T., JAILLET S. et al. *Consolidation par optimisation en vue d'une analyse diachronique par scanner laser terrestre de la falaise de glace du lac du Miage (Massif du Mont Blanc)*. Cahiers de géographie, 2011, numéro 12, Images et modèles 3D en milieux naturels, pages 88-89

[5] Architecte de bâtiments. *Les plans d'architecte (avec exemples)*, [en ligne]. Disponible sur : <https://www.architecte-batiments.fr/les-plans-d-architecte/>. (consulté le 27/03/2020)

[6] Historic England 2018 (2018). *3D laser scanning for heritage : advice and guidance on the use of laser scanning in archaeology and architecture*. Swindon : Historic England, 113 pages

[7] HIGGINS S. *The past and future of handheld 3D scanning*. Lidar Magazine, [en ligne], 2020, Volume 10, numéro 1, pages 6-12. Disponible sur : <https://ifnk2kzc2lrg7y02yhzokml4-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2020/02/LM_Vol10No1.pdf>. (consulté le 30/03/2020)

[8] DEWEZ T.J.B., YART S., THUON Y. et al. *Towards cavity-collapse hazard maps with ZEB-Revo handheld laser scanner point clouds*. The Photogrammetric record 32 (160), 2017, pages 354-376

[9] Lidar Magazine. *ZEB-REVO a revolution in mobile indoor mapping*, [en ligne]. Disponible sur : <https://lidarmag.com/2016/03/14/zeb-revo-a-revolution-in-mobile-indoor-mapping/>. (consulté le 30/03/2020)

[10] GeoSLAM (2017). *ZEB-REVO RT User's manual v1.0.1*. GeoSLAM, 80 pages

[11] Hokuyo. *UTM-30LX-FEW*, [en ligne]. Disponible sur : <https://www.hokuyo-aut.jp/search/single.php?serial=223>. (consulté le 01/04/2020)

[12] NOCERINO E., MENA F., REMONDINO F. et al. *Investigation of indoor and outdoor performance of two portable mapping systems*. In : SPIE 10332 (Videometrics, Range Imaging and Applications XIV), Munich, 26 juin 2017, 16 pages

[13] GeoSLAM (Année non spécifiée). *La solution ZEB-REVO RT*. Geotopo, 3 pages

[14] RICARD B. *ZEB-REVO : étude d'un scanner dynamique mobile et ses applications au sein d'un cabinet*. Mémoire présenté en vue d'obtenir le diplôme d'ingénieur CNAM, spécialité géomètre et topographe : ESGT, 2017, 60 pages

[15] GeoSLAM. *What is SLAM?*, [en ligne]. Disponible sur : <https://GeoSLAM.com/blog/2019/01/18/what-is-slam/>. (consulté le 02/04/2020)

[16] HUBOVA I., GeoSLAM, Ingénieure d'applications principale. Correspondance par mail, 2020

[17] BOSSE M., ZLOT R. *Continuous 3D scan-matching with a spinning 2D laser*. In : Proceedings – IEEE International conference on robotics and Automation, Kobe, 17-12 mai 2009, pages 4312-4319

[18] BOSSE M., ZLOT R., FLICK P. *Zebedee: Design of a Spring-Mounted 3-D Range Sensor with Application to Mobile Mapping*. IEEE Transactions on Robotics, 2012, volume 28, pages 1104-1119

[19] BOSSE M., ZLOT R. *Efficient large-scale 3D mobile mapping and surface reconstruction of an underground mine*. In : YOSHIDA K., TADOKORO S. (ed.), Field and Service Robotics: Results of the 8th International Conference. STAR, 2014, 658 pages

[20] LOWE T., CSIRO – Data61, Scientifique expérimental supérieur. Correspondance par mail, 2020

[21] GeoSLAM (2019). *GeoSLAM Hub 5.3 User Manual*. GeoSLAM, 48 pages

[22] REID M. *What is Geospatial SLAM?*. Lidar Magazine, [en ligne], 2016, Volume 6, numéro 4, 2 pages. Disponible sur : < http://lidarmag.com/wp-content/uploads/PDF/LIDARMagazine_Reid-GeospatialSLAM_Vol6No4.pdf>. (consulté le 02/04/2020)

[23] YART S., MASSON F. (2018). *Levé 3D au scanner laser mobile de la falaise de la Corniche Basque – Communes de Ciboure et Urrugne (64)*. Observatoire Côte Aquitaine. BRGM/RP-67271-FR – Rapport final, 37 pages

[24] DEWEZ T.J.B, YART S., MASSON F. et al. *Quantification géotechnique 3D de fractures souterraines au ZEB-Revo: les carrières d'Hermonville (Marne, Est de la France)*. In : Journées aléa gravitaire, Besançon, 24-25 octobre 2017, pages 183-186

[25] GHERISSI J.B. *Réalisation de plans d'alignement à partir de relevés terrestres par scanner dynamique*. Mémoire présenté en vue d'obtenir le diplôme d'ingénieur CNAM, spécialité géomètre et topographe : ESGT, 2019, 80 pages

[26] SCHOENMAEKERS M. *Mise en place de nouvelles méthodes d'acquisition rapides au scanner pour les plans d'architecture – Impacts sur la qualité et la précision*. Mémoire du projet de fin d'études, spécialité topographie : INSA Strasbourg, 2019, 45 pages

[27] MOREL V. *Optimisation des modes et méthodes d'acquisition et de traitement de levés de bâtiments par scanner 3D, et valorisation de la donnée par maquette numérique*. Mémoire de soutenance de diplôme d'ingénieur INSA, spécialité topographique : INSA Strasbourg, 2019, 65 pages

[28] TOSCHI I., RODRIGUEZ-GONZALVEZ R., REMONDINO F. et al. *Accuracy evaluation of mobile mapping system with advanced statistical methods*. In : 3D Virtual Reconstruction and visualization of complex architecture, Ávila, 25-26-27 février 2015, 9 pages

[29] LAGUE D., BRODU N., LEROUX J. *Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner : Application to the Rangitikei canyon (N-Z)*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, [en ligne], 2013, Volume 82, pages 10-26. Disponible sur : <https://www.sciencedirect.com/journal/isprs-journal-of-photogrammetry-and-remote-sensing/vol/82/suppl/C>. (consulté le 09/04/2020)

[30] Gexia Foncier Expert (2020). *Tutoriel GeoSLAM*. Gexia Foncier Expert, 8 pages

[31] LANDES T. et GRUSSENMEYER P. Les principes fondamentaux de la lasergrammétrie terrestre : systèmes et caractéristiques (1/2). Revue XYZ, 2011, numéro 128, pages 37-49

[32] Hoyuko (Année non spécifiée). *UTM-30LX-FEW – Instruction Manual*. Hoyuko, 2 pages

[33] Hydronav. *Datasheet – Trimble TX5 Scanner* [en ligne]. Disponible sur : <http://www.hydronav.com/pdf/TX5.pdf>. (consulté le 15/04/2020)

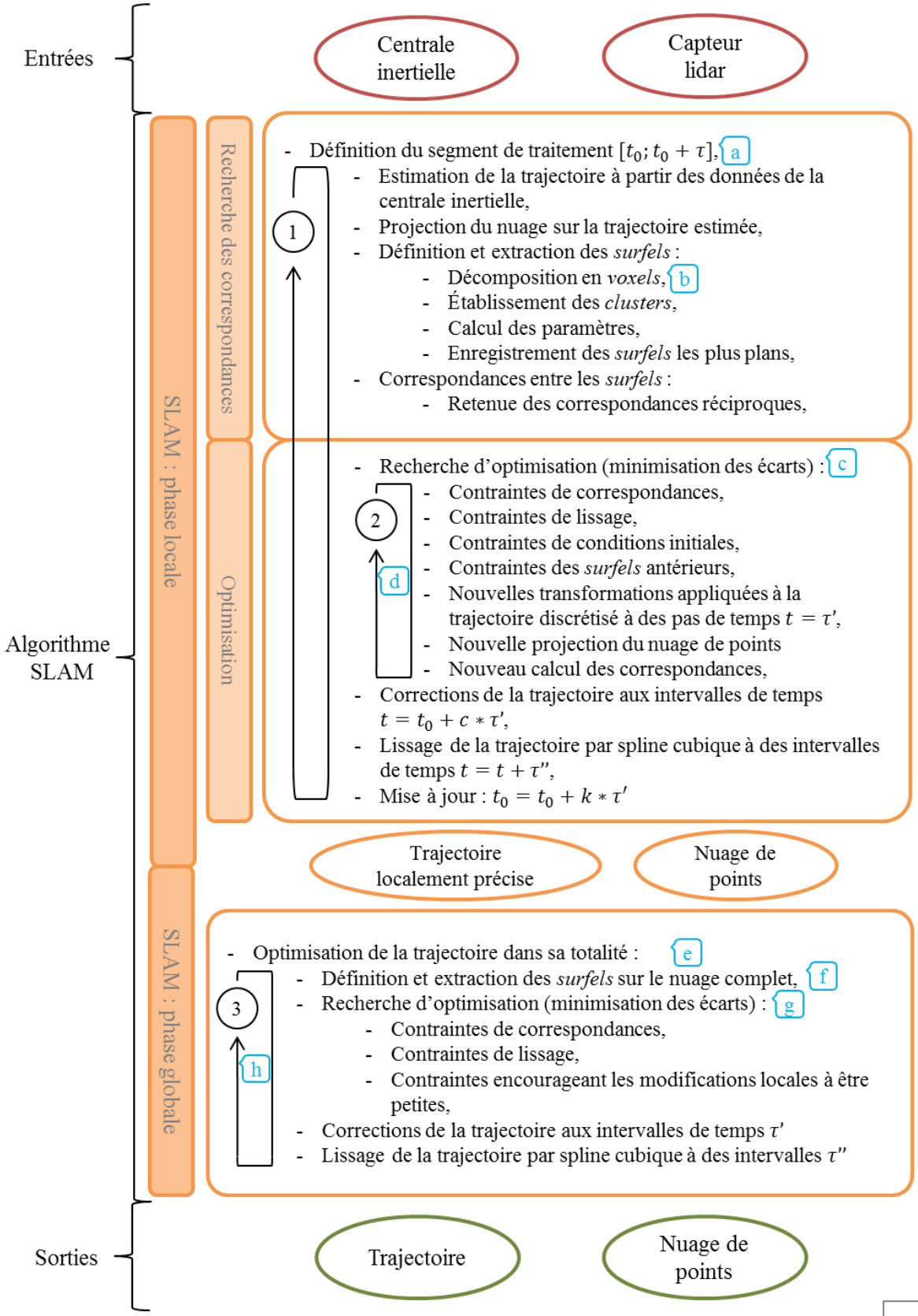
[34] Trimble (2012). *User Guide – Trimble TX5 3D Laser Scanner*. Trimble, 115 pages

[35] Gexia Foncier Expert (2019). *Relevé Scanner pour bâtiment*. Gexia Foncier Expert, 5 pages

Table des annexes

Annexe 1 Algorithme SLAM mis en œuvre 60
Annexe 2 Statistiques et théorie des erreurs 63
Annexe 3 Résultats détaillés de l'étude de répétabilité : environnement riche 67
Annexe 4 Résultats de l'étude de reproductibilité : environnement VEFA 68
Annexe 5 Résultats de l'étude de reproductibilité : environnement de type hangar 69
Annexe 6 Cotes et surfaces comparées pour l'étude de justesse – Plan de niveau 71
Annexe 7 Cotes comparées pour l'étude de justesse – Coupe intérieure 72
Annexe 8 Cotes comparées pour l'étude d'articulation de la géométrie de levé 73

Annexe 1
Algorithme SLAM mis en œuvre



1/3

Les différents pas de temps sont tels que $\tau > \tau' > \tau''$ et correspondent respectivement à :

- τ : longueur temporelle du segment
- τ' : pas d'échantillonnage pour l'optimisation de la trajectoire
- τ'' : pas d'échantillonnage pour le lissage de la trajectoire

Sur la schématisation du traitement, présentée en page 1/3 de cette annexe 1, il est possible de remarquer que certains processus sont itératifs :

1. La phase locale de l'algorithme SLAM travaille en découpant la trajectoire en segment temporel de temps τ et fait progresser ces derniers par un nombre fini c de pas de temps τ' tel que $c * \tau' < \tau$ jusqu'au traitement de toute la trajectoire.

2. Le processus d'optimisation, visant à minimiser les erreurs de correspondances et les déviations de mesures de la centrale inertielle, calcule itérativement les corrections à appliquer à la trajectoire aux pas de temps τ' dans le segment jusqu'à un seuil de convergence donné ou qu'un nombre maximal d'itérations ait été atteint

3. La phase globale de l'algorithme SLAM, visant à appliquer des petites corrections sur la trajectoire estimée en phase locale, calcule itérativement ces dernières jusqu'à un seuil de convergence donné ou qu'un nombre maximal d'itérations ait été atteint

Sur la schématisation du traitement (1/3), il est également possible de voir les paramètres de calcul sur lesquels il est possible d'influer par le biais du logiciel GeoSLAM Hub :

SLAM : phase locale		SLAM : phase globale	
a	*Window Size*	e	*Rigidity*
b	*Voxel Density*	f	*Prioritize planar surfaces*
c	*Rigidity / Prioritize laser constraints*	g	*Start/Finish closed loop*
d	*Convergence Threshold*	h	*Convergence Threshold*

La figure ci-dessous (figure A) permet de se rendre grossièrement compte du processus de traitement mis en œuvre.

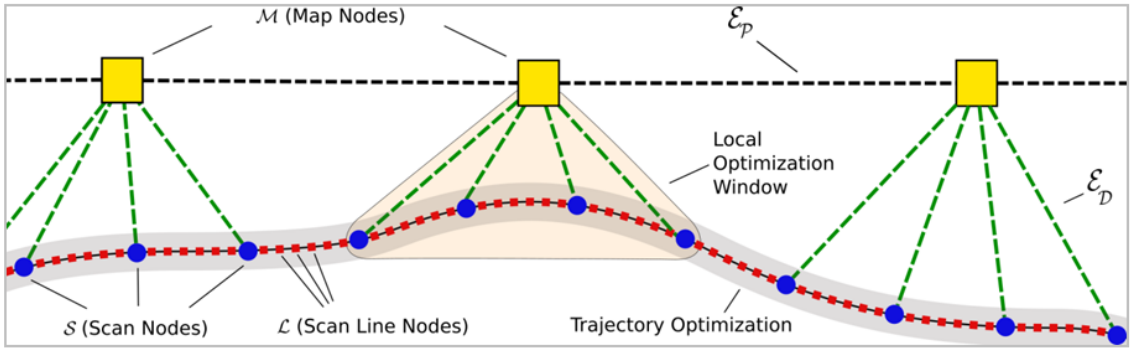


Figure A, source : DROESCHEL D. et al., *Efficient Continuous-time SLAM for 3D Lidar-based online mapping*, 2018

Intervalles τ	Contraintes de correspondances
Intervalles τ'	Contraintes de lissage
Intervalles τ''	Contraintes de conditions initiales

Annexe 2
Statistiques et théorie des erreurs

D'un point de vue général, il apparait que la distribution des erreurs accidentelles (= erreurs aléatoires), définies comme la « composante de l'erreur de mesure qui, dans des mesurages répétés, varie de façon imprévisible »[1], peut être modélisée par une loi normale de manière réaliste puisque cette dernière est « adaptée à la description statistique des erreurs accidentelles liées à des processus de mesure »[2].

Cette loi normale, notée $N(\mu, \sigma)$, se caractérise par une densité de probabilité $d_{\mu,\sigma}$ (1), formant une courbe de Gauss (figure A), définie par l'espérance mathématique (=moyenne) μ (2) du jeu de données X et son écart type σ (3).

$$d_{\mu,\sigma}(x_i) = \frac{1}{\sigma * \sqrt{2*\pi}} e^{-\frac{1}{2} * \frac{(x_i-\mu)^2}{\sigma^2}}, \text{ où } x_i \text{ est une valeur du jeu de données } X \quad (1)$$

$$\mu = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^{N} x_i, \text{ où } N \text{ est le nombre de valeurs } x_i \text{ du jeu de données } X \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{var_X} = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^{N} (x_i - \mu)^2} \quad (3)$$

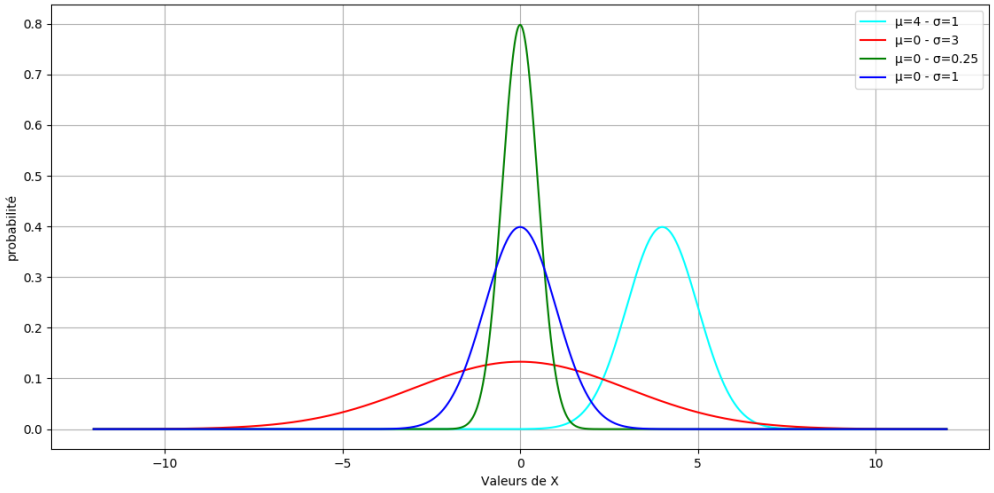


Figure A : Courbes de Gauss formées par la loi normale

Il est important de remarquer les nombreuses caractéristiques de cette loi normale (figure B) :

- Elle est symétrique par rapport à μ,
- 50% des valeurs de X sont dans l'intervalle $[\mu - 0.67 * \sigma ; \mu + 0.67 * \sigma]$,
- 68,3% des valeurs de X sont dans l'intervalle $[\mu - \sigma ; \mu + \sigma]$,
- 95% des valeurs de X sont dans l'intervalle $[\mu - 1{,}96 * \sigma ; \mu + 1{,}96 * \sigma]$,
- 0,13% des extremums de X sont dans les intervalles $]-\infty ; \mu - 3 * \sigma[$ et $]\mu + 3 * \sigma ; +\infty[$

[1] JCGM 2012 (2012). *Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés*

[2] DURAND S. (2019). *Topométrie de précision*

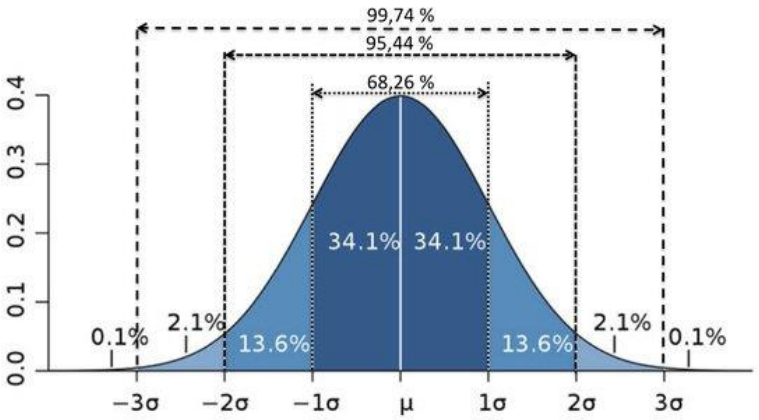


Figure B : Caractéristiques remarquables de la loi normale, source : http://www.ilovestatistics.be/probabilite/loi-normale.html

Cependant, de nombreux documents, dont [A] et [B], affirment dans le cadre de travaux portant sur les technologies 3D, que les erreurs de ces appareils ne suivent pas l'hypothèse d'une loi normale, pouvant provenir de la présence d'erreurs résiduelles ou d'un mauvais filtrage du nuage de points. Selon ces documents, pour l'affirmation de précisions sur ces technologies, il est nécessaire de vérifier que la distribution des erreurs correspond à l'hypothèse de loi normale. Cela peut donc être fait par le biais de vérifications graphiques et/ou numériques.

Les vérifications graphiques peuvent être effectuées par le biais du diagramme quantile-quantile (figure C). Ce dernier permet la comparaison des quantiles réels issus du jeu de données et des quantiles théoriques de la loi normale, de moyenne et écart type estimés sur le même jeu de données. En traçant les valeurs des quantiles trouvées, il est donc possible de remarquer rapidement si la distribution du jeu de données peut être approchée par une loi normale.

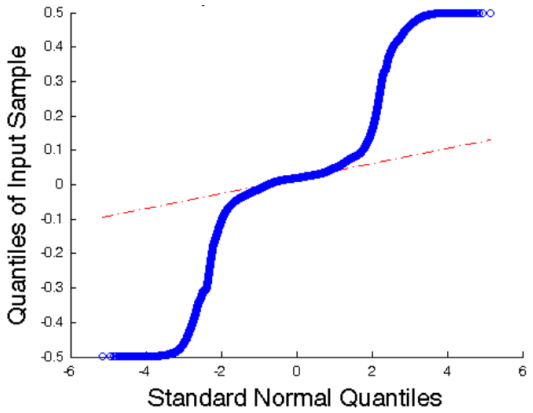


Figure C : Diagramme quantile-quantile, source : Nocerino E., Menna F., Remondino F. et al [A]

Les vérifications numériques consistent elles au calcul des valeurs d'asymétrie, *Skewness*, (4) et d'aplatissement, *Kurtosis*, (5) avant leurs comparaisons avec les valeurs théoriques devant être obtenues dans un cas où la distribution est gaussienne (figure D).

$$Skewness = \frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i-\mu)^3}{N*\sigma^3}$$, est nulle en cas de loi normale (4)

$$Kurtosis = \frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i-\mu)^4}{N*\sigma^4}$$, est égale à 3 en cas de loi normale (5)

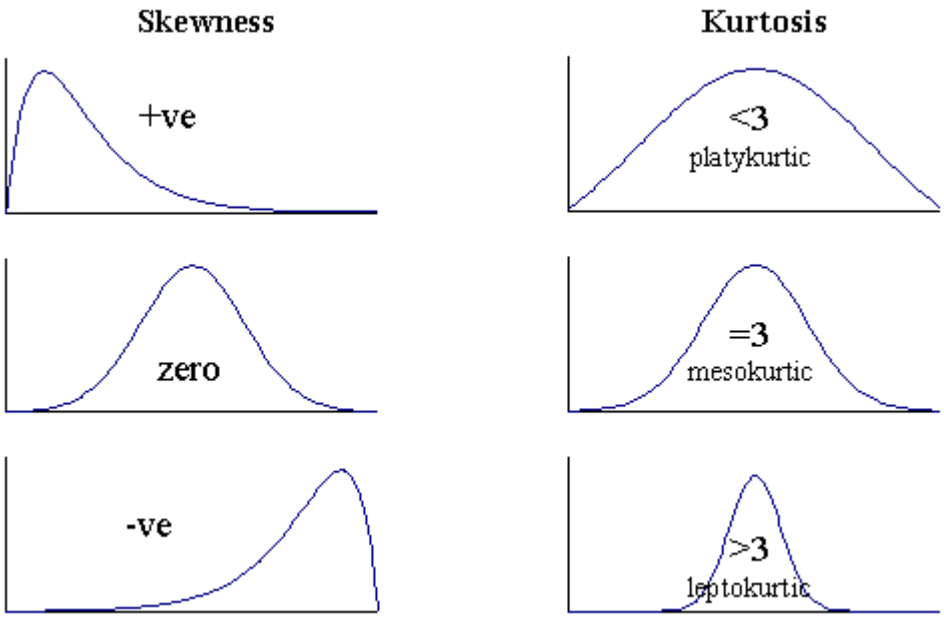


Figure D : Illustration de Skewness et Kurtosis,
source : https://www.epixanalytics.com/modelassist/AtRisk/images/15/image403.gif

Ainsi, à partir de ces vérifications, selon [B], 3 solutions sont envisageables en fonction des résultats :

1. La distribution du jeu de données suit une loi normale.
   Les valeurs de la moyenne et de l'écart type peuvent servir à fournir les valeurs de précisions de l'appareil.
2. La distribution du jeu de données ne suit pas une loi normale.
   i. Elimination des valeurs aberrantes en ne conservant que les valeurs dans l'intervalle $[\mu - 3 * \sigma\,;\mu + 3 * \sigma]$.
   À partir des valeurs conservées, il est donc possible de donner les valeurs de précisions par le biais de la moyenne et de l'écart type.
   Cependant, [B] nous apprend que, même si après ce filtrage il apparait que la distribution des données est plus proche de celle de la loi normale, il reste de nécessaire de procéder à une estimation plus robuste :
   ii. Conservation de toutes les valeurs mais affirmation des précisions de l'appareil à l'aide de valeurs statistiques permettant une estimation robuste aux valeurs aberrantes.

La robustesse, impliquant « une insensibilité aux écarts dus à une non-conformité aux hypothèses sous-jacentes à un modèle probabiliste »[3], peut être obtenue, selon [A] par le biais des calculs des valeurs statistiques que sont la médiane m_X (6) et la déviation normalisée absolue à la médiane $NMAD$ (7). L'emploi des écarts inter quantiles $Q_X(\alpha)$ (8) peut également permettre de fournir les plages de données robustes dans lesquelles α% des valeurs se situent. Il est important de remarquer, qu'un quantile est une valeur divisant un jeu de données X en deux parties en fonction de la proportion de valeurs du jeu de données y étant inférieures, par exemple $Q_X(0{,}6)$ est la valeur telle que 60% des valeurs du jeu de données X y sont inférieures.

$$m_X = Q_X(0{,}5) \quad (6)$$

$$NMAD = 1.4826 * mediane(|x_i - m_x|) = 1.4826 * MAD \quad (7)$$

$$\Delta Q_X(\alpha) = Q_X\left(1 - \frac{1-\alpha}{2}\right) - Q_X\left(\frac{1-\alpha}{2}\right), \text{ avec } \alpha \text{ le pourcentage recherché pour l'écart} \quad (8)$$

Il convient de préciser qu'ici, MAD correspond à la médiane des valeurs absolues des écarts entre les valeurs du jeu de données X et la médiane de ce jeu de données. Selon [C], le fait d'utiliser les valeurs absolues de ces écarts entraine le fait que MAD correspond à $0.67 * \sigma$ et en multipliant cette valeur par 1.4826, il possible de donner une estimation robuste de σ ($1.4826 * 0.67 \approx 1$).

Le document [A] évoque également l'utilisation de la bi variance doublement pondérée (*biweight midvariance*), mais [D] indique que, par rapport aux deux types de robustesse définis (résistance et robustesse d'efficacité), si cette valeur possède ces deux caractéristiques, elle n'est réellement utile que dans les situations où une grande performance est nécessaire. Dans les autres cas, la déviation absolue à la médiane (MAD), estimateur résistant et moyennement robuste en termes d'efficacité, ou les écarts inter quantiles restent suffisants.

Bibliographie – Annexe 2 :

[A] NOCERINO E., MENA F., REMONDINO F. et al. *Investigation of indoor and outdoor performance of two portable mapping systems*. In : SPIE 10332 (Videometrics, Range Imaging and Applications XIV, Munich, 26 juin 2017, 16 pages

[B] TOSCHI I., RODRIGUEZ-GONZALVEZ R., REMONDINO F. et al. *Accuracy evaluation of mobile mapping system with advanced statistical methods*. In : 3D Virtual Reconstruction and visualization of complex architecture, Ávila, 25-26-27 février 2015, 9 pages

[C] HOHLE J. *The assesment of the absolute planimetric accuracy of airborne laserscanning*. In : Workshop laser scanning 2011, Calgary, 29-31 Août 2011, 6 pages

[D] National institute of standards and technology – Statistical engineering division, *Biweight midvariance* [en ligne]. Disponible sur : <https://www.itl.nist.gov/div898/software/dataplot/refman2/auxillar/biwmidv.htm>. (consulté le 23/04/2020)

[3] RAPACCHI B. (1994). *Une introduction à la notion de robustesse*

Annexe 3
Résultats détaillés de l'étude de répétabilité : environnement riche

	Écarts entre nuages			Bruit		
	NMAD	Incertitude	Q(0.95)	Épaisseur de trait	NMAD	Résolution
Initial	-	-	-	*0.034*	*0.010*	*0.008*
Rep. 01	0.015	0.004	0.079	0.028	0.008	0.008
Rep. 02	0.014	0.003	0.064	0.024	0.007	0.008
Rep. 03	0.013	0.003	0.060	0.025	0.007	0.008
Rep. 04	0.011	0.003	0.045	0.032	0.009	0.008

Détails des résultats de l'étude de répétabilité en environnement riche avec la méthodologie initiale, résultats exprimés en mètres

Les résultats sont ici exposés de la même façon qu'au sein de l'étude. La ligne '*Initial*' correspond aux chiffres obtenus sur le nuage initial et les lignes '*Rep. XX*' correspondent aux valeurs obtenues sur les différents nuages de répétabilité.

Comme exposé dans le document, les résultats montrent une petite variation (près de 0.03m pour Q(0.95)), qui peut notamment être expliquée par le fait que la rotation des pièces constatée peut être différente et plus ou moins prononcée.

Annexe 4
Résultats de l'étude de reproductibilité : environnement VEFA

	Écarts entre nuages			Bruit		
	NMAD	Incertitude	Q(0.95)	Épaisseur de trait	Répartition	Résolution
Initial	*0.007*	*0.004*	*0.038*	*0.026*	*0.007*	*0.008*
Allure lente	0.008	0.003	0.040	0.030	0.009	0.008
Amers	0.009	0.003	0.049	0.027	0.007	0.009
Mouvements horizontaux	0.007	0.003	0.043	0.026	0.007	0.008
PLC activé	0.007	0.003	0.035	0.025	0.007	0.008
Voxel Density :						
(-1)	0.007	0.003	0.037	0.033	0.010	0.009
(3)	0.005	0.003	0.027	0.024	0.007	0.008

Synthèse des résultats probants de l'étude de reproductibilité des paramètres de levé et de traitement en environnent VEFA, résultats exprimés en mètres

Les résultats sont ici exposés de la même façon qu'au sein de l'étude.

Comme exposé dans le document, ces derniers nous permettent de remarquer que les changements détectés ne sont pas significatifs mais que le recalcul de la boucle SLAM en faisant varier le paramètre *Voxel Density* à -1 dégrade les résultats de bruit du nuage.

Annexe 5
Résultats de l'étude de reproductibilité : environnement de type hangar

Modèle de trajectoire B	Écarts entre nuages			Bruit		
	NMAD	Incertitude	Q (0.95)	Épaisseur de trait	NMAD	Résolution
Initial	*0.006*	*0.007*	*0.031*	*0.042*	*0.012*	*0.012*
Allure lente	0.010	0.006	0.043	0.043	0.012	0.012
Mouvements :						
• Verticaux	0.012	0.007	0.046	0.054	0.014	0.013
• Horizontaux	0.010	0.007	0.046	0.043	0.012	0.011

Synthèse des résultats probants de l'étude de reproductibilité en environnent type hangar sur le modèle de trajectoire B, résultats exprimés en mètre(s)

Modèle de trajectoire A	Écarts entre nuages			Bruit		
	NMAD	Incertitude	Q (0.95)	Épaisseur de trait	NMAD	Résolution
Initial	-	-	-	*0.042*	*0.012*	*0.012*
PLC activé	0.038	0.009	0.128	0.053	0.015	0.016
Rigidity (-5)	0.039	0.009	0.128	0.043	0.013	0.015
Convergence Threshold (5)	0.037	0.009	0.134	0.042	0.012	0.015
Voxel Density :						
• -1	0.029	0.008	0.097	0.039	0.012	0.015
• 3	0.023	0.008	0.102	0.037	0.011	0.015

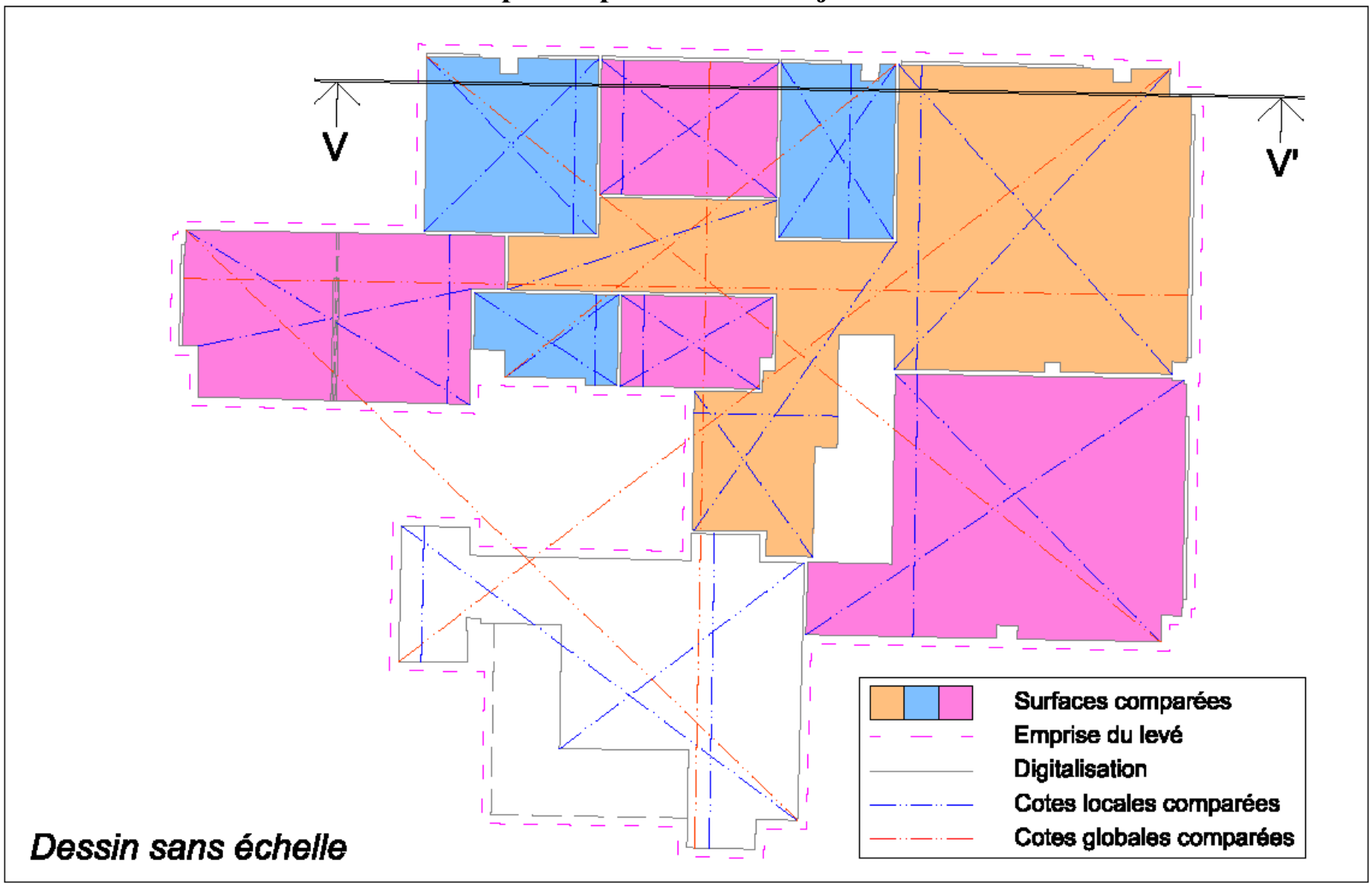
Synthèse des résultats probants de l'étude de reproductibilité en environnent type hangar sur le modèle de trajectoire A, résultats exprimés en mètre(s)

Les résultats sont ici présentés de la même façon que pour l'environnement de type industriel (un tableau pour chaque modèle de trajectoire).

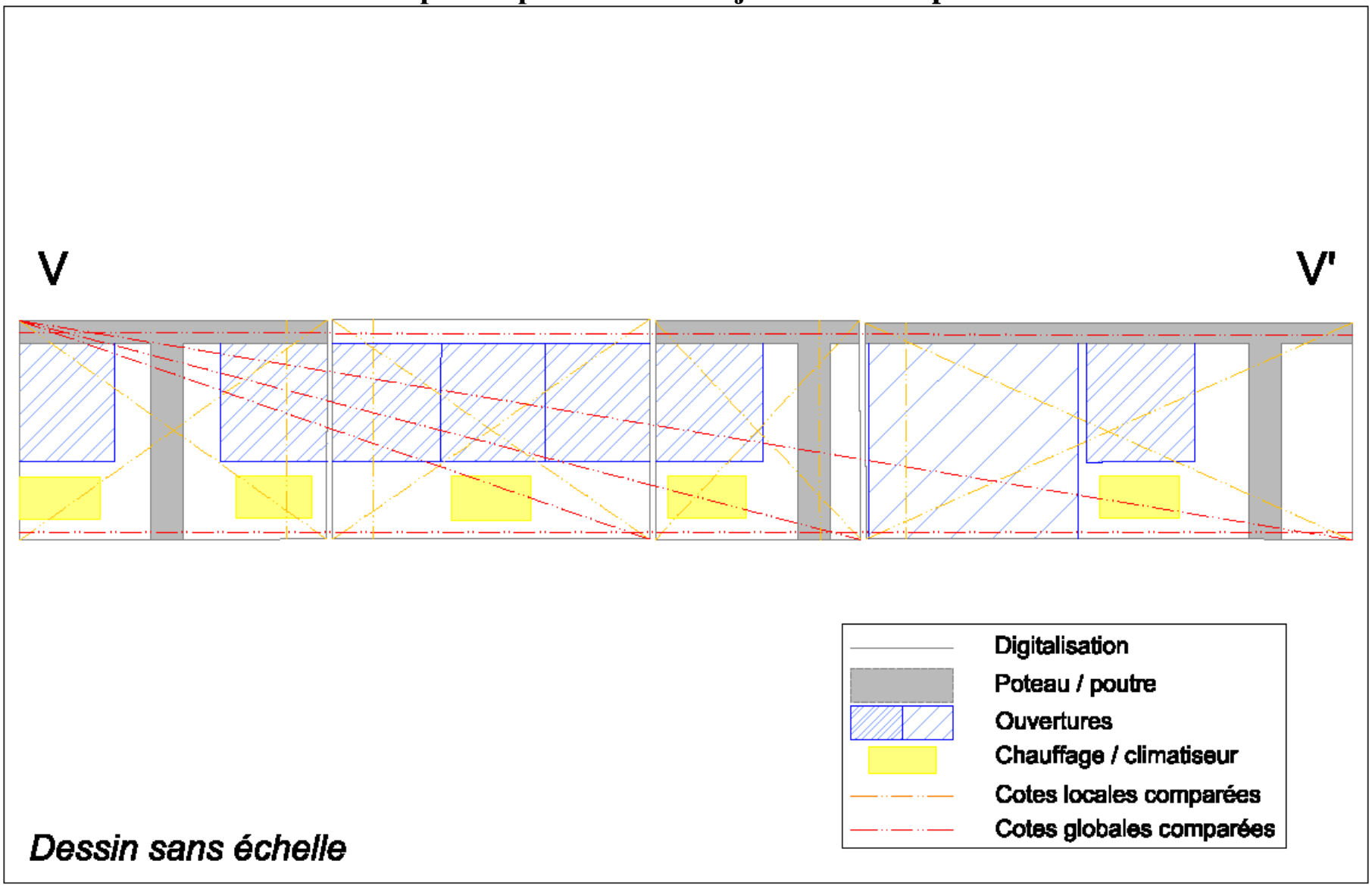
Comme évoqué dans le document, ces derniers permettent de voir que les trois tests effectués sur le modèle de trajectoire B présentent des résultats significatifs en termes d'impacts sur le nuage initial mais n'améliorent pas le bruit ni la résolution.

Pour les levés basés sur la trajectoire A (comparés avec un levé de la même emprise et acquis dans les conditions initiales), les options PLC, *Convergence Threshold* (fixée à 5) et *Rigidity* (à -5) ont le plus d'impacts sur le nuage mais aucune n'as d'effet positif sur le bruit ou la résolution. Seule l'option *Voxel Density* permet l'obtention de meilleurs résultats en termes de bruit.

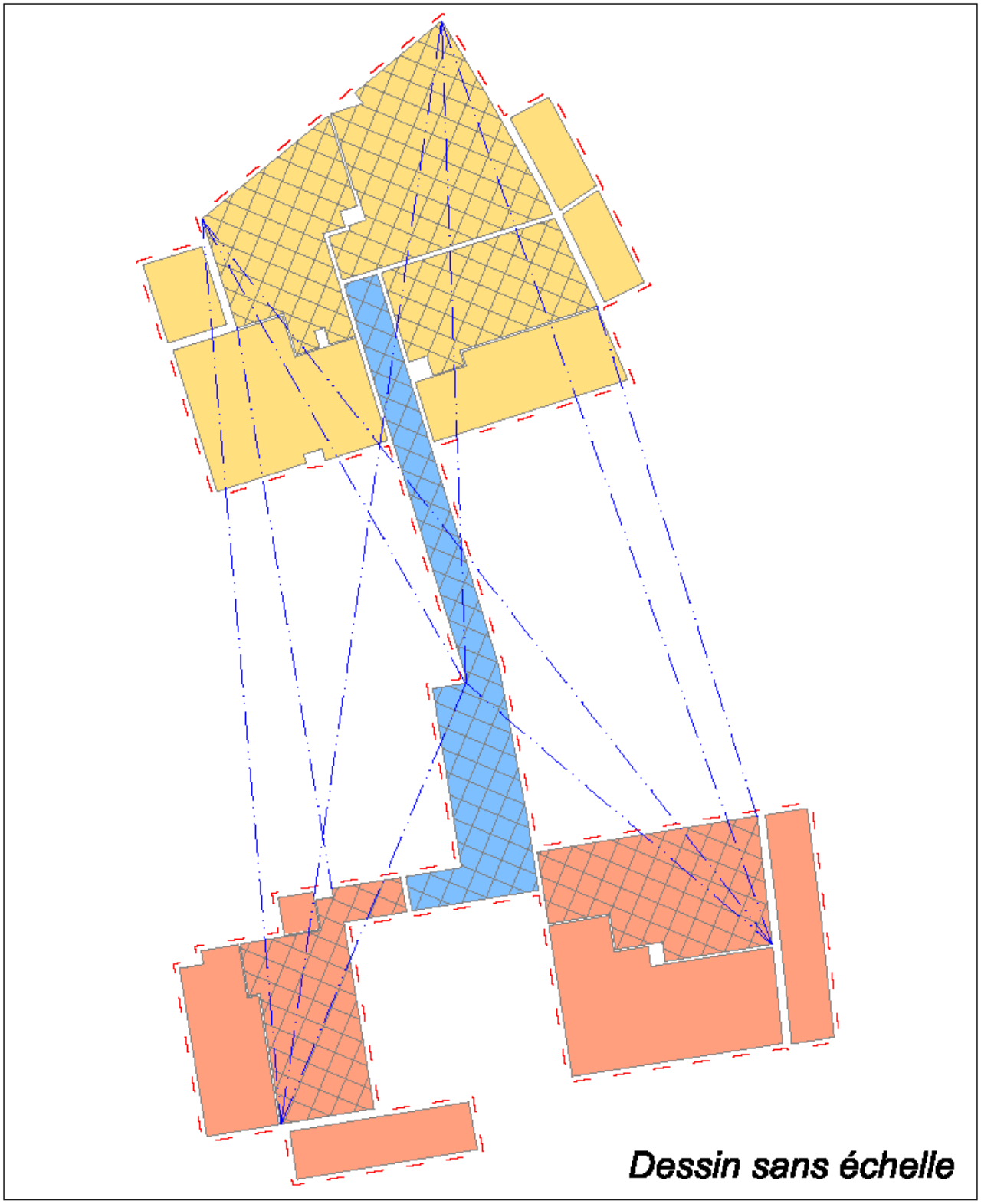
Annexe 6
Cotes et surfaces comparées pour l'étude de justesse – Plan de niveau



Annexe 7
Cotes comparées pour l'étude de justesse – Coupe intérieure



Annexe 8
Cotes comparées pour l'étude d'articulation de la géométrie de levé



Tables des illustrations

Figure 1 : Notions de justesse et de fidélité, source : DÉSENFANT M., De la mesure @ la métrologie 8
Figure 2 : Schéma du calcul de distance selon la méthode M3C2, source : Dimitri Lague et al. [29] 21
Figure 3 : Schéma de divergence du faisceau laser, source : www. physics.stackexchange.com ... 26
Figure 4 : Comparaisons des trajectoires initiale et de distance scanner-objet plus courte 31
Figure 5 : Modèles de trajectoires effectués en environnement de type industriel 34
Figure 6 : Illustrations du problème de géométrie rencontré en environnement de type hangar 41
Figure 7 : Cubes de tailles connues disposés au sein du levé 43
Figure 8 : Géométrie de levé réalisée lors de l'étude d'articulation de la méthodologie finale 50

Tableau 1 : Précisions et niveaux de détails attendus en travaux architecturaux 10
Tableau 2 : Synthèse des résultats mathématiques des écarts de l'étude de répétabilité 23
Tableau 3 : Synthèse des résultats initiaux de bruit et résolution 27
Tableau 4 : Synthèse des résultats probants de l'étude de reproductibilité en environnent riche, résultats exprimés en mètre(s) 30
Tableau 5 : Synthèse des résultats probants de l'étude de reproductibilité en environnent type industriel sur le modèle de trajectoire B, résultats exprimés en mètre(s) 35
Tableau 6 : Synthèse des résultats probants de l'étude de reproductibilité en environnent type industriel sur le modèle de trajectoire A, résultats exprimés en mètre(s) 36
Tableau 7 : Synthèse des résultats de l'étude de la nouvelle méthodologie et de variantes à petite échelle, résultats annoncés en mètres 47
Tableau 8 : Synthèse des résultats de la comparaison de surfaces et de cotes effectuées sur les méthodologies initiale et finale à petite échelle 48

Précision relative et niveau de détails, les limites d'utilisation du ZEB-Revo RT

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Le Mans 2020

RESUME

Les différents tests menés lors de cette étude ont permis de voir que si la méthodologie de levé est importante pour minimiser les erreurs de géométrie, les opérations de retraitement des boucles SLAM ne se montrent en revanche utiles qu'en cas de grande incohérence géométrique. En termes de géométrie, la réalisation de plusieurs boucles n'est nécessaire que si levé nécessite plus de 10 minutes. Dans ce cas, leur assemblage montre de meilleurs résultats sur les zones de recouvrement d'un même étage.

De plus, il s'avère qu'en raison de l'utilisation d'instruments de précision limitée, les levés effectués à l'aide du ZEB-Revo RT ne peuvent pas être améliorés. Ainsi, ce dernier ne peut permettre la réalisation de travaux architecturaux car sa précision relative (0.016 m) et son faible niveau détails (0.03 m) ne permettent pas l'édition de plans à grandes échelles (1/50 ou 1/100).

Mots clés : scanner dynamique, GeoSLAM, ZEB-Revo RT, levé d'intérieur

---

SUMMARY

The different types of tests made during this work have enabled to see that the topographic study's methodology can minimize geometric errors despite the SLAM data reprocessing shows themselves useful only in case of large geometric inconsistency. In terms of topographic study's geometry, the achievement of several loop is required only if the data acquisition need more than 10 minutes. In this case, their registration shows better results on a single-storey recovery area.

Furthermore, it's proving that because of the use of limited accuracy instruments, topographic study made with the ZEB-Revo RT can't be improved. Thus, this scanner can't be employed in architectural works because of its relative accuracy (0.016 m) and its soft level of details (0.03 m) which not enable the reproduction of large-scaled map (1/50 or 1/100).

Key words : mobile mapping, GeoSLAM, ZEB-Revo RT, indoor surveying