

Mémoire

Auteur : Mossay, Guillaume

Promoteur(s) : Billen, Roland; Sarton, Nicolas

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en sciences géographiques, orientation géomatique, à finalité spécialisée en géomètre-expert

Année académique : 2021-2022

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/15892>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



**Faculté des sciences
Département de géographie**

**Relevé technique en intérieur :
Comparaison entre un laserscan terrestre (TLS) et un
laserscan mobile (MLS)**

Mémoire présenté par : Guillaume MOSSAY

pour l'obtention du titre de

Master en sciences géographiques, orientation géomatique,

à finalité Géomètre-expert

Année académique :

2021-2022

Date de défense :

Septembre 2022

Président de jury :

Pr. René WARNANT

Promoteurs :

Pr. Roland BILLEN

Mr. Nicolas SARTON

Jury de lecture :

Pr. René WARNANT

Pr. Geoffrey HOUBRECHTS

Remerciements

Pour commencer, je souhaiterais remercier mes promoteurs, Monsieur Billen et Monsieur Sarton, pour leurs conseils et leur accompagnement tout au long de ce travail.

Plus particulièrement, je voudrais remercier Monsieur Sarton (et le bureau de Géomètres-Experts et d'ingénierie, 4D Management) pour la proposition du sujet de ce mémoire et pour l'organisation avec la société Leica pour le prêt du laserscan. Pour la mise à disposition de la station totale Trimble S8, du laserscan Leica RTC 360 et d'un ordinateur pour réaliser les traitements. Mais aussi pour l'aide précieuse lors des prises de mesures sur le terrain.

Je tiens aussi à remercier les lecteurs, Monsieur Houbrechts et Monsieur Warnant, pour l'intérêt porté à ce mémoire.

J'adresse également mes remerciements à la société Leica qui m'a généreusement prêté le laserscan Leica BLK2GO et expliqué le détail de son fonctionnement.

Ensuite, je tiens à remercier l'Unité de Géomatique pour la mise à disposition de l'ordinateur 3D pour réaliser mes traitements et plus particulièrement Monsieur Nys, pour son aide dans la programmation des ellipses d'erreurs et Monsieur Jonlet, pour ses conseils avisés.

Pour finir, je voudrais remercier ma famille et mes proches pour leur soutien et plus particulièrement Mlle Alice Boodts, Mlle Marie Boodts et M. Pascal Boodts pour leur relecture de ce mémoire.

Résumé

Cette étude a pour but d'analyser les performances de deux types d'instruments Leica : le RTC 360, laserscan terrestre (TLS), et le BLK2GO, laserscan mobile (MLS). Le secteur des MLS étant en plein développement depuis plusieurs années, l'objectif de ce travail est de déterminer s'il est actuellement possible d'utiliser un MLS dans une mise en situation réelle d'un relevé en intérieur. Pour ce faire, une tolérance a été fixée arbitrairement à maximum un centimètre d'erreur pour le domaine de la construction. Il existe plusieurs variables et techniques permettant d'influencer la précision du nuage de points d'un MLS, telles que la vitesse d'avancement, la complexité de la trajectoire et l'assemblage de plusieurs nuages de points, créant des groupes. Ces techniques sont comparées entre elles et la meilleure est retenue pour être comparée au nuage de points du TLS.

Lors de la première campagne de prise de mesure, dans un premier temps, un relevé à la station totale du site et plusieurs cibles, servant de points communs fixes entre les nuages de points a été réalisé. Ensuite, le site a été relevé au TLS, ce premier nuage sert de référence. Pour finir, plusieurs scans ont été réalisés au MLS afin de pouvoir les comparer entre eux. Pour comparer les nuages de points entre eux, deux méthodes ont été sélectionnées d'après la littérature. La première consiste en la méthode point to point, qui compare les distances entre plusieurs points fixes dont les coordonnées sont connues. Pour ce faire, plusieurs cibles ont d'abord été relevées à la station totale dans un système local. Cette méthode permet de comparer les nuages de points du TLS et du MLS par rapport aux distances mesurées sur la base des coordonnées locales. Cette méthode est la plus précise car elle se base sur des valeurs provenant de la station totale, qui est l'instrument de mesures le plus précis dans ce cas. Cette méthode a par ailleurs mis en évidence que la précision du TLS est considérablement plus élevée que celle du MLS. La seconde méthode utilisée correspond au cloud to mesh, qui compare des nuages de points par rapport à un maillage, créé à partir d'un nuage de points de référence. Dans ce cas, le nuage de points du TLS est utilisé en raison de sa meilleure précision démontrée par la méthode point to point. Cette méthode permet de comparer les nuages dans leur ensemble et non seulement quelques points spécifiques. La deuxième campagne de prise de mesure a permis de valider le choix des paramètres déduits comme optimaux par la première campagne en appliquant la même méthodologie. De plus, cette deuxième campagne a permis de tester également les nouvelles évolutions du BLK2GO (MLS).

Dans l'ensemble, l'analyse et la comparaison de ces deux instruments montrent que le TLS reste nettement supérieur en termes de qualité et de précision par rapport au MLS. Néanmoins, les récentes évolutions permettent de s'approcher de la tolérance fixée, les MLS seront bientôt utilisables dans de

nombreux secteurs de la construction. De plus, leur facilité d'utilisation leur offre un gain de temps non négligeable.

Abstract

The purpose of this study is to analyze the performance of two types of instruments: the Leica RTC 360, a terrestrial laser scanner (TLS), and the Leica BLK2GO, a mobile laser scanner (MLS). As the MLS sector has been in full development for several years, the purpose of this work is to determine whether it is currently possible to use an MLS in a real situation of an indoor survey. For this purpose, an error tolerance of maximum one centimeter has been arbitrarily set. There are several variables and techniques to improve the accuracy of the point cloud of an MLS, such as the speed of progress, the complexity of the trajectory and the assembly of several point clouds to form groups. These techniques are compared with each other to determine the best one. Finally, the latter is compared to the TLS point cloud.

During the first measurements campaign, a survey of the site and several targets, serving as fixed common points between the point clouds, was performed with a total station. Then, the site was surveyed with the TLS, this first point cloud serves as a reference. Finally, several scans were made with the MLS in order to compare them. To compare the point clouds between them, two methods have been selected from the literature. The first one is the point to point method, which compares the distances between several fixed points with known coordinates. For this purpose, several targets were first surveyed at the total station in a local system. This method compares the TLS and MLS point clouds to the distances calculated on the base of local coordinates. This method is the most accurate because it is based on values from the total station, which is the most accurate measurement instrument in this case. This method has also shown that the accuracy of TLS is considerably higher than that of MLS. The second method used is the cloud to mesh, which compares point clouds with a mesh, created from a reference point cloud. In this case, the TLS point cloud is used as reference because of its higher accuracy demonstrated by the point to point method. This method allows a comparison of the clouds as a whole unit and not just a few specific points. The second campaign of measurements allowed, on the one hand, to validate the choice of the optimal parameters proved during the first campaign by following the same methodology. And on the other hand, it allowed to test the new evolutions of the BLK2GO (MLS).

Overall, the analysis and comparison of these two instruments shows that the TLS remains clearly superior in terms of quality and accuracy compared to the MLS. Nevertheless, recent developments allow the MLS to approach the set tolerance and will soon be usable in many construction sectors. Moreover, their ease of use offers a significant time saving.

Table des matières

CHAPITRE 1. INTRODUCTION	13
CHAPITRE 2. ÉTAT DE L'ART	15
2.1 CONCEPTS CLÉS	15
2.1.1 <i>Terrestrial Laser Scanners (TLS)</i>	15
2.1.2 <i>Mobile Mapping Systems (MMS)</i>	15
2.1.3 <i>Mobile Laser Scanners (MLS)</i>	16
2.1.4 <i>Simultaneous localisation and mapping (SLAM)</i>	17
2.1.5 <i>Building Information Modeling (BIM)</i>	20
2.2 POURQUOI COMPARER UN TLS ET UN MLS ?	22
2.2.1 <i>Comparaison Terrestrial and Mobile Laser Scanners (TLS vs MLS)</i>	22
2.3 COMMENT COMPARER UN TLS ET UN MLS ?.....	24
2.3.1 <i>Méthodes de comparaison</i>	24
2.3.2 <i>Comparaison qualitative</i>	24
2.3.3 <i>Comparaison quantitative</i>	27
2.3.3.1 Par points spécifiques	27
2.3.3.2 Comparaison de nuages.....	28
2.3.3.2.1 Cloud to cloud distance (C2C).....	29
2.3.3.2.2 Point to plane distance	30
2.3.3.2.3 Mesh to mesh distance (surface to surface).....	31
2.3.3.3 Récapitulatif	31
CHAPITRE 3. HYPOTHÈSES DE RECHERCHE	33
CHAPITRE 4. MÉTHODOLOGIE	35
4.1 SITE D'ANALYSE	36
4.2 FORMATION AU MANIEMENT DU BLK2GO	36
4.3 MATÉRIEL UTILISÉ	39
4.3.1 <i>Appareils de mesures</i>	39
4.3.1.1 Station totale Trimble S8	39
4.3.1.2 Leica RTC 360 (TLS)	39
4.3.1.3 Leica BLK2GO (MLS).....	40
4.3.2 <i>Autre petit matériel</i>	41
4.3.3 <i>Logiciels</i>	41
4.3.3.1 Octave™	41
4.3.3.2 Cyclone Register 360™	41
4.3.3.3 CloudCompare™	42
4.3.3.4 Excel™	42
4.4 PRISES DE MESURES	43
4.4.1 <i>Contraintes physiques et horaires</i>	43

4.4.2	<i>Cheminement à la station totale (Trimble S8)</i>	44
4.4.3	<i>Relevés TLS (Leica RTC 360)</i>	45
4.4.4	<i>Relevés MLS (Leica BLK2GO)</i>	47
4.5	PRÉ-TRAITEMENTS	51
4.5.1	<i>Cheminement et détermination des coordonnées</i>	51
4.5.2	<i>Nettoyage et regroupement des nuages de points (Cyclone Register 360)</i>	54
4.5.2.1	Nettoyage des nuages de points.....	54
4.5.2.2	Détection des cibles	54
4.5.2.3	Regroupement de nuages en groupes	55
4.5.2.4	Attribution des coordonnées	58
4.6	TRAITEMENTS	59
4.6.1	<i>Point to point (Cyclone Register 360)</i>	59
4.6.1.1	Point to point distance.....	59
4.6.1.2	Position relative aux coordonnées.....	60
4.6.1.3	Distances entre les points connus.....	60
4.6.2	<i>Cloud to mesh (CloudCompare™)</i>	61
4.6.2.1	Cloud to mesh	62
4.6.2.2	Construction du maillage (mesh)	63
4.6.2.3	Alignement des nuages avec le mesh	64
4.6.2.4	Cloud to mesh	65

CHAPITRE 5. ANALYSES DE LA 1^{ÈRE} CAMPAGNE DE MESURE.....66

5.1.1	<i>Description de l'analyse qualitative</i>	67
5.1.2	<i>Description de l'analyse quantitative</i>	68
5.1.2.1	Point to point	68
5.1.2.2	Cloud to mesh	71
5.2	SITE D'ANALYSE.....	71
5.2.1	<i>Site d'analyse : B5a vs B5b</i>	71
5.2.1.1	Comparaison Qualitative.....	72
5.2.1.2	Comparaison Quantitative	72
5.3	PARAMÈTRES VARIABLES	73
5.3.1	<i>Vitesse d'avancement</i>	73
5.3.1.1	Comparaison qualitative	74
5.3.1.2	Comparaison quantitative.....	75
5.3.1.2.1	Point to point.....	75
5.3.1.2.2	Cloud to mesh statistique	77
5.3.1.2.3	Cloud to mesh visuel.....	78
5.3.1.3	Synthèse	80
5.3.2	<i>Complexité du parcours</i>	81
5.3.2.1	Comparaison qualitative	82
5.3.2.2	Comparaison quantitative.....	82
5.3.2.2.1	Point to point.....	82

5.3.2.2.2	Cloud to mesh statistique	85
5.3.2.2.3	Cloud to mesh visuel.....	86
5.3.2.3	Synthèse	88
5.3.3	<i>Assemblage</i>	89
5.3.3.1	Comparaison qualitative	90
5.3.3.2	Comparaison quantitative.....	91
5.3.3.2.1	Point to point.....	91
5.3.3.2.2	Cloud to mesh statistique	93
5.3.3.2.3	Cloud to mesh visuel.....	94
5.3.3.3	Synthèse	95
5.3.4	<i>Choix de la meilleure technique</i>	96
5.4	COMPARAISON TLS ET MLS.....	97
5.4.1	<i>Comparaison globale TLS et MLS</i>	97
5.4.1.1	Comparaison statistique.....	97
5.4.1.2	Comparaison visuelle.....	99
5.4.1.2.1	Scan global	99
5.4.1.2.2	Géométries simples	100
5.4.1.2.3	Géométries fines	101
5.4.1.2.4	Cibles à damier	101
5.4.1.2.5	Ghost walls.....	102
5.4.1.2.6	Décalage des murs et des cibles	103
5.4.2	<i>Comparaison entre nuage de points du TLS et le meilleur du MLS</i>	105
5.4.2.1	Comparaison qualitative	105
5.4.2.2	Comparaison quantitative.....	105
5.4.2.2.1	Point to point.....	105
5.5	SYNTHÈSE.....	105
CHAPITRE 6. ANALYSES DE LA 2^{ÈME} CAMPAGNE DE MESURE.....		108
6.1.1	<i>Site de mesure</i>	108
6.1.2	<i>Contrainte horaire</i>	108
6.1.3	<i>Évolutions de l'appareil</i>	108
6.1.4	<i>Méthode utilisée</i>	109
6.1.4.1	Assemblage de nuages de points.....	109
6.1.4.2	Boucle simple	110
6.1.5	<i>Prise de mesure</i>	110
6.1.6	<i>Pré-traitements et traitements</i>	112
6.1.7	<i>Analyses</i>	113
6.1.7.1	Comparaison qualitative	113
6.1.7.2	Comparaison quantitative.....	113
6.1.7.2.1	Point to point.....	113
6.1.7.3	Synthèse	115
CHAPITRE 7. CONCLUSION		117

CHAPITRE 8. SOURCES.....	119
CHAPITRE 9. ANNEXES	123

Liste des figures

FIGURE 1 : BOUCLE NON FERMÉE	19
FIGURE 2 : 1 BOUCLE.....	19
FIGURE 3 : 2 BOUCLES	20
FIGURE 4 : SCHÉMA DE LA RÉOLUTION EN MM/M DES LASERSCANS.....	25
FIGURE 5 : INFLUENCE DE LA TANGENCE SUR LA DENSITÉ.....	26
FIGURE 6 : CLOUD TO CLOUD (MÉTHODE DES PLUS PROCHES VOISINS)	31
FIGURE 7 : CLOUD TO MESH	31
FIGURE 8 : CLOUD TO SURFACE	31
FIGURE 9 : MESH TO MESH.....	31
FIGURE 10 : SCHÉMA DE LA STRUCTURE DE LA MÉTHODOLOGIE	35
FIGURE 11 : DÉPLACEMENT RECOMMANDÉ EN INTÉRIEUR	37
FIGURE 12 : PASSAGE DES ESCALIERS	37
FIGURE 13 : PASSAGE DES PORTES	38
FIGURE 14 : DÉBUT D'UN SCAN	38
FIGURE 15 : RTC 360.....	39
FIGURE 16 : BLK2GO.....	40
FIGURE 17 : DISPOSITION SCHÉMATIQUE DES STATIONS DU CHEMINEMENT.....	44
FIGURE 18 : ELLIPSES D'ERREURS.....	52
FIGURE 19 : SCHÉMA DU DÉVELOPPEMENT DE LA COMPARAISON MLS ET TLS	66
FIGURE 20 : SCHÉMA POUR L'ORIENTATION POUR LES EXPLICATIONS	67
FIGURE 21 : COMPARAISON POINT TO POINT (MOYENNES ET IC EN M) POUR L'ENSEMBLE DES CIBLES SELON LE PLAN XY	69
FIGURE 22 : COMPARAISON POINT TO POINT (MOYENNES ET IC EN M) POUR L'ENSEMBLE DES CIBLES SELON L'AXE Z.....	70
FIGURE 23 : NUAGE DE POINTS DU B5A	72
FIGURE 24 : NUAGE DE POINTS DU B5B	72
FIGURE 25 : COUPE B5A	72
FIGURE 26 : COUPE B5B	72
FIGURE 27 : COMPARAISON POINT TO POINT (MOYENNES ET IC EN M) DES SCANS G1 & G2 ET G6 & G7 SELON LE PLAN XY	75
FIGURE 28 : COMPARAISON POINT TO POINT (MOYENNES ET IC EN M) DES SCANS G1 & G2 ET G6 & G7 SELON L'AXE Z.	76
FIGURE 29 : COMPARAISON CLOUD TO MESH (MOYENNES ET IC EN M) DES SCANS G1 & G2 ET G6 & G7.....	77
FIGURE 30 : G1 - 10CM - OUEST_HAUT	78
FIGURE 31 : G2 - 10CM - OUEST_HAUT	78
FIGURE 32 : G6 - 30CM - OUEST_BAS	79
FIGURE 33 : G7 - 30CM - OUEST_BAS	79
FIGURE 34 : G6 - COUPE OUEST	80
FIGURE 35 : G7 - COUPE OUEST	80

FIGURE 36 : COMPARAISON POINT TO POINT (MOYENNES ET IC EN M) DES SCANS G2, G6, G11 ET G19 SELON LE PLAN XY	82
FIGURE 37 : COMPARAISON POINT TO POINT (MOYENNES ET IC EN M) DES SCANS G2, G6, G11 ET G19 SELON L'AXE Z ..	83
FIGURE 38 : COMPARAISON CLOUD TO MESH (MOYENNES ET IC EN M) DES SCANS G2, G6 ET G19	85
FIGURE 39 : G2 - 30CM - OUEST_HAUT	86
FIGURE 40 : G6 - 30CM - OUEST_HAUT	86
FIGURE 41 : G19 - 50CM - OUEST_HAUT	86
FIGURE 42 : G19 - COUPE OUEST - DÉPLACEMENT HORIZONTAL.....	87
FIGURE 43 : G19 - COUPE NORD (CÔTÉ OUEST) - DÉPLACEMENT VERTICAL	87
FIGURE 44 : COMPARAISON POINT TO POINT (MOYENNES ET IC EN M) DES SCANS G2, G6, G11, G19 ET GR.1 SELON LE PLAN XY	91
FIGURE 45 : COMPARAISON POINT TO POINT (MOYENNES ET IC EN M) DES SCANS G2, G6, G11, G19 ET GR.1 SELON L'AXE Z.....	92
FIGURE 46 : COMPARAISON CLOUD TO MESH (MOYENNES ET IC EN M) DES SCANS G6, G19, GR.1, GR.3 ET GR.4.....	93
FIGURE 47 : G6 - 30CM - OUEST_BAS	94
FIGURE 48 : GR1 - 30CM - OUEST_BAS.....	94
FIGURE 49 : G19 - 50CM - OUEST_HAUT	95
FIGURE 50 : GR3 - 50CM - OUEST_HAUT	95
FIGURE 51 : GR4 - 50CM - OUEST_HAUT	95
FIGURE 52 : COMPARAISON POINT TO POINT (MOYENNES ET IC EN M) POUR L'ENSEMBLE DES SCANS SELON LE PLAN XY	98
FIGURE 53 : COMPARAISON POINT TO POINT (MOYENNES ET IC EN M) POUR L'ENSEMBLE DES SCANS SELON L'AXE Z	98
FIGURE 54 : NUAGE DE POINTS DU RTC 360 (TLS).....	99
FIGURE 55 : NUAGE DE POINTS G19 DU BLK2GO (MLS).....	99
FIGURE 56 : NUAGE DE POINTS DU RTC 360 (TLS).....	100
FIGURE 57 : NUAGE DE POINTS G2 DU BLK2GO (MLS).....	100
FIGURE 58 : NUAGE DE POINTS DU RTC 360 (TLS).....	101
FIGURE 59 : NUAGE DE POINTS G16 DU BLK2GO (MLS).....	101
FIGURE 60 : NUAGE DE POINTS DU BLK2GO (MLS).....	101
FIGURE 61 : GHOST WALLS DU RTC 360 (TLS).....	102
FIGURE 62 : GHOST WALLS DU RTC 360 (TLS).....	102
FIGURE 63 : COUPE BLK2GO - G7 - CÔTÉ OUEST	103
FIGURE 64 : DÉCALAGE BLK2GO - G6.....	103
FIGURE 65 : DÉCALAGE DES CIBLES BLK2GO - G6	103
FIGURE 66 : COMPARAISON POINT TO POINT (MOYENNES ET IC EN M) SELON LE PLAN XY POUR LES SCANS GR.5, S10, G6, G19 ET GR.1	114
FIGURE 67 : COMPARAISON POINT TO POINT (MOYENNES ET IC EN M) SELON L'AXE Z POUR LES SCANS GR.5, S10, G6, G19 ET GR.1	115

Liste des tableaux

TABLEAU 1 : FONCTIONNEMENT THÉORIQUE DES BOUCLES	19
TABLEAU 2 : SYNTHÈSE DE LA COMPARAISON ENTRE TLS ET MLS.....	24
TABLEAU 3 : SCHÉMAS RÉCAPITULATIFS DES DIFFÉRENTES TECHNIQUES DE COMPARAISON DE NUAGES DE POINTS	31
TABLEAU 4 : SCHÉMAS DESCRIPTIFS DES MANIEMENTS DU BLK2GO (MLS).....	37
TABLEAU 5 : FICHE TECHNIQUE RTC 360.....	39
TABLEAU 6 : FICHE TECHNIQUE BLK2GO.....	40
TABLEAU 7 : DESCRIPTION DU CHEMINEMENT	45
TABLEAU 8 : ENSEMBLE DES SCANS RÉALISÉS.....	50
TABLEAU 9 : DIMENSIONS DES ELLIPSES.....	53
TABLEAU 10 : GROUPEMENT DES SCANS	57
TABLEAU 11 : COMPARAISON DES SCANS DU B5A ET DU B5B	71
TABLEAU 12 : SCANS AVEC VARIATION DE VITESSE	74
TABLEAU 13 : ENSEMBLE DES SCANS UTILISÉS POUR L'ANALYSE DE LA COMPLEXITÉ DU PARCOURS	81
TABLEAU 14 : ENSEMBLE DES SCANS UTILISÉS POUR L'ANALYSE DES ASSEMBLAGES.....	89
TABLEAU 15 : ENSEMBLE DES GROUPES UTILISÉS POUR L'ANALYSE DES ASSEMBLAGES.....	90
TABLEAU 16 : RÉCAPITULATIF DE LA COMPARAISON POINT TO POINT	106
TABLEAU 17 : RÉCAPITULATIF DE LA COMPARAISON CLOUD TO MESH	106
TABLEAU 18 : ENSEMBLE DES SCANS RÉALISÉS LORS DE LA DEUXIÈME CAMPAGNE DE PRISE DE MESURE	111
TABLEAU 19 : ENSEMBLE DES GROUPES UTILISÉS POUR L'ANALYSE DES ASSEMBLAGES.....	112

Chapitre 1. Introduction

Les évolutions technologiques sont nombreuses, chaque année de nouveaux brevets, de nouvelles innovations apparaissent. Ce constat concerne également les domaines géographiques notamment ceux de la géométrie et de la géomatique. Néanmoins, les professionnels du métier ne sautent pas directement sur le nouvel appareil car leur coût est assez élevé. Ainsi, ce mémoire s'intéresse à un nouvel instrument dont le type est de plus en plus utilisé mais dont les performances n'ont été que peu analysées. En effet, ce travail consiste en une comparaison entre un "Terrestrial Laser Scanner" (TLS) ou laserscan terrestre, qui est un laserscan lidar sur trépied, et un "Mobile Laser Scanner" (MLS) ou laserscan mobile, qui est un laserscan portable. La grande différence entre les deux réside dans le fait que le TLS fonctionne par stations successives, durant lesquelles le laserscan doit rester immobile à l'horizontal alors que le MLS peut prendre des mesures en mouvement. En général, les TLS sont dotés de meilleurs capteurs et permettent des mesures d'une précision supérieure car ils ne bougent pas lors de la prise de mesure. Néanmoins, l'utilisation d'un MLS peut fortement réduire le temps de prise de mesure. Au vu de cette différence principale, il est intéressant d'étudier les impacts que ces caractéristiques, notamment la présence de capteurs supérieurs sur le TLS ou la rapidité du MLS, ont sur la qualité des résultats produits. L'objectif de ce travail est donc de déterminer si la précision d'un MLS lors d'une telle mise en situation est suffisante ou non.

Ce travail envisage donc de répondre à une question de comparaison : *"La précision des MLS actuels est-elle suffisante pour l'utilisation dans le domaine du bâtiment et de la reconstruction 3D par rapport aux instruments actuellement utilisés, les TLS, et est-il possible d'améliorer cette précision ?"* L'ajout d'une seconde partie à la question principale trouve son intérêt dans les bonnes pratiques des utilisateurs de l'instrument car celles-ci peuvent toujours améliorer la qualité des prises de mesure. Il est donc intéressant de les relever en réalisant différentes méthodes de mesure.

Dans le but de comparer ces instruments, il est essentiel de créer une mise en situation réelle d'un professionnel pratiquant, un géomètre-expert qui devrait numériser l'intérieur d'un bâtiment. En effet, ce travail trouve son utilité pour les métiers du bâtiment, ainsi, il doit faire référence à des mesures qui sont réellement réalisées dans des conditions vraisemblables pour que chacun puisse s'approprier les résultats selon son application. À cette fin, différentes mesures avec les deux types d'instruments, TLS et MLS, sont réalisées et comparées entre elles. De plus, un mesurage avec une station totale a été effectué pour pouvoir comparer les valeurs des TLS et MLS avec les valeurs fournies par un appareil d'une plus grande précision. Pour ce faire différents instruments ont été prêtés pour la durée des prises de mesure. La station totale Trimble S8 et un TLS Leica RTC 360 ont été fournis par le

bureau de Géomètres-Experts et d'ingénierie 4D Management. Le MLS Leica BLK2GO a été directement prêté par la société Leica.

Pour répondre à ces questionnements concernant la qualité des prises de mesure des TLS et des MLS et les conditions qui améliorent cette qualité, différentes étapes ont été mises en place. Tout d'abord, un état de l'art, c'est-à-dire une revue de la littérature, a été effectué dans le but d'identifier les manières de comparer les résultats de différents instruments de prise de mesure. Cette revue de la littérature a mis en avant différentes méthodes qui sont présentées et utilisées dans la méthodologie lorsqu'elles étaient d'application avec les appareils comparés dans ce mémoire, le TLS et le MLS. Ensuite, la méthodologie est présentée en indiquant d'abord les pré-traitements qui ont été effectués pour pouvoir utiliser les nuages de points produits et puis, les traitements mis en place qui permettent de comparer ces nuages de points. Ces traitements ont fourni des données et des images qui ont pu être comparées de deux manières. Premièrement, les images ont été analysées avec la méthode de la comparaison visuelle. Deuxièmement, une comparaison statistique des données fournies par les traitements permet également d'analyser les nuages de points plus précisément. À la suite de ces comparaisons, une discussion générale permet d'étudier les résultats produits par type d'instrument. Enfin, la conclusion permet de mettre en évidence les éléments essentiels à retenir notamment pour les professionnels.

Ce travail a donc été réalisé dans la suite logique des évolutions récentes et constantes des appareils de mesure utilisés par les professionnels du métier de géomètre. Ainsi, ce mémoire vise à aider ces professionnels dans leur choix de matériel et dans l'identification des bonnes pratiques à adopter lors de leur utilisation.

Chapitre 2. État de l'art

2.1 Concepts clés

2.1.1 Terrestrial Laser Scanners (TLS)

Depuis de nombreuses années les systèmes de scanner 3D sont utilisés dans de nombreux domaines d'application tels que la cartographie 3D, l'ingénierie civile, l'architecture, l'archéologie, la production minière, etc. Cette méthode, au contraire des méthodes de relevé plus classique, permet de prendre un grand nombre de mesures en un temps restreint. Pour des surfaces petites à moyennes il est possible d'atteindre des précisions millimétriques. Ces caractéristiques de temps et de précision des systèmes de scanner 3D facilitent le travail pour des relevés de précision lorsque ces lasers sont utilisés (Lipecki, 2020).

Les points sont mesurés dans les trois dimensions à l'aide de systèmes Lidar (Light Detection and Ranging). Il existe également plusieurs principes de mesure différents qui se basent soit sur des mesures de "durée de vol", durée entre l'émission et le retour de l'onde (pulse-based scanner), soit sur des mesures de phases (phase-based scanner), soit sur une triangulation optique. Ces trois méthodes se différencient par des distances d'application et des précisions différentes. Il est donc possible de choisir un type de capteur en fonction des applications, même si dans la plupart des cas, la précision est millimétrique (Mulahusic, 2018 ; Lipecki, 2020).

Le principe d'utilisation a évolué au fil du temps. En effet, pour les scanners les plus anciens, il fallait mettre correctement l'appareil à niveau et utiliser des cibles visibles entre plusieurs scans pour relier ces derniers. Actuellement, de plus en plus de machines utilisent des GNSS (Global Navigation Satellite System) ou d'autres systèmes de localisation tels que le SLAM (Simultaneous localisation and mapping). Ces nouvelles méthodes permettent à l'appareil de suivre le cheminement du scan et de se pré-localiser. Ensuite, les différents nuages de points sont assemblés par "cloud to cloud" par des logiciels qui détectent des géométries communes entre les différents nuages (Lipecki, 2020).

2.1.2 Mobile Mapping Systems (MMS)

L'émergence des Mobile Mapping Systems s'est vue démontrée vers la fin des années 1980 aux Etats-Unis. Le terme mobile mapping system comprend tous les systèmes mobiles utilisés pour la cartographie à deux ou trois dimensions. Il s'agit donc d'un terme assez général pour tous les systèmes

qui peuvent, au contraire des TLS, continuer à récolter des données tout en restant en mouvement. Il existe deux grands types de MMS :

- Les premiers sont des capteurs photogrammétriques tels que des appareils photos ;
- Les deuxièmes sont les systèmes qui se basent sur des systèmes Lidars. Il s'agit dans ce cas de Mobile Laser Scanning System ou Mobile Laser Scanner (MLS). Ces derniers sont les plus fréquemment utilisés et ont des domaines d'application fort variés.

L'intérêt des MMS s'explique par leur grande vitesse de prise de mesure qui permet donc une réduction importante en termes de temps et d'argent (Puente, 2013).

2.1.3 Mobile Laser Scanners (MLS)

Les Mobile Laser Scanners sont donc les Mobile Mapping Systems qui utilisent la technologie Lidar pour leurs mesures. La majorité des MLS est constituée de plusieurs sous-systèmes qui ont différents rôles et qui peuvent généralement être utilisés de manière indépendante ou en complémentarité avec d'autres dans le but d'améliorer le résultat final. Les systèmes de base intégrés sont :

- des scanners laser ;
- des appareils photos ;
- une unité de mesure inertiel (IMU) ;
- un Global Navigation Satellite System (GNSS).

Les lasers permettent des mesures de distance assez précises, tandis que les photos sont généralement employées pour colorier le nuage de points. Les systèmes IMU et GNSS ont pour but de localiser l'appareil et de suivre le tracé de l'instrument. L'avantage des GNSS est de pouvoir situer le nuage de points dans un système de référence connu, mais cette méthode ne fonctionne pas en intérieur. Dans ce cas, tout le suivi se réalise à travers des IMU et d'autres instruments intégrés à la machine. Actuellement, il est de plus en plus fréquent que des SLAM (Simultaneous localisation and mapping) soient utilisés à la place ou en complément des IMU (Puente *et al.*, 2013 ; Piniotis *et al.*, 2020).

Les domaines d'application des MLS sont très variés. Par conséquent il en existe un grand nombre avec des caractéristiques différentes, par exemple, les point d'intérêt peuvent porter sur une bonne précision, un avancement rapide ou différents angles de vue (Puente *et al.*, 2013).

2.1.4 Simultaneous localisation and mapping (SLAM)

Cette méthode est devenue primordiale dans l'utilisation des MLS et de plus en plus dans les TLS actuels. Le Simultaneous Localisation And Mapping permet simultanément de suivre le tracé parcouru lors de la prise de mesure, tout en modélisant ce tracé en 2D ou en 3D. Ce type de système permet au MLS de se repérer et de suivre le tracé de l'opérateur afin de faciliter la reconstruction des nuages de points.

Cette méthode présente de nombreux avantages ainsi que des inconvénients. Elle permet de réaliser un scan en continu sans devoir procéder à une nouvelle mise en station pour chaque endroit à numériser. De plus, il n'est plus nécessaire d'utiliser des cibles entre chaque station pour permettre la reconstruction entre les différents nuages de points successifs. Le SLAM utilise des capteurs qui se repèrent aux données acquises par superposition. Cette méthode permet donc une première reconstruction (Mathworks, nd).

Même si le principe du SLAM reste globalement le même, il existe certaines différences non négligeables entre les capteurs et les méthodes de traitement. On différencie principalement deux types de capteurs. Les capteurs du type photogrammétrie et ceux du type Lidar.

- Photogrammétrie : Cette technique utilise généralement des appareils photos, intégrés à l'instrument, qui suivent le parcours du scan et reconstruisent le tracé par photogrammétrie. Des logiciels intégrés repèrent des points communs entre les photographies successives et permettent ainsi une reconstruction globale. Cette méthode a l'avantage de fournir une quantité importante de données car une donnée est attribuée à chaque pixel (2D) ou voxel (3D). Néanmoins, cette méthode est dépendante du nombre, du type et de la qualité du ou des capteur(s). Effectivement, le type d'appareil photo peut influencer la précision et le nombre de capteurs peut influencer la bonne reconstruction en trois dimensions. Par exemple, un seul capteur aura plus de difficultés à bien repérer la profondeur du terrain (Mathworks, nd ; ADAM Technology, 2008).
- Lidar : Les mesures laser sont généralement plus précises que celles obtenues par photogrammétrie. En effet, celle-ci se base sur des images en 2D et nécessite plus de traitements pour obtenir des données en trois dimensions. De plus, ces images numérisées ne fournissent qu'une seule donnée par pixel et sont donc très dépendantes du capteur utilisé. Pour attribuer des données des pixels aux points, différents algorithmes peuvent être utilisés. Mais de manière générale, tous ces traitements peuvent induire une erreur supplémentaire par rapport aux mesures lidars, avec lequel chaque mesure correspond à une donnée. Mais avec les mesures au laser, les mesures ne sont pas obtenues

en chaque point de l'espace. Ainsi, le résultat du nuage de points est généralement moins dense. Néanmoins, la précision des mesures réalisées avec le Lidar est meilleure que la précision obtenue en utilisant la photogrammétrie (Mathworks, nd).

En résumé, la photogrammétrie est souvent peu coûteuse car elle peut se faire avec tout type d'appareil photo et permet aussi une prise de mesure rapide et simple. Cependant, la précision avec les capteurs Lidars est plus fine (Mathworks, nd).

Il est également possible, comme pour de nombreux instruments du marché, d'utiliser les deux méthodes dans un même instrument. Par exemple, le Leica BLK2GO utilise d'une part un SLAM Lidar pour calculer sa position en 3D et pour différencier la géométrie de l'espace et des objets. D'autre part, il applique un SLAM photogrammétrique afin de détecter des similitudes sur les prises de vue successives (Leica, 2022).

L'avantage d'utiliser les deux méthodes correspond principalement à garantir un certain suivi dans tous les environnements. Toutes les méthodes présentent des faiblesses qui peuvent dans ce cas être compensées par un autre système. Par exemple, la photogrammétrie ne fonctionne pas bien dans des environnements sombres alors que ces conditions ne posent pas de problème pour le Lidar. A contrario, certaines surfaces légèrement réfléchissantes peuvent induire des erreurs pour les mesures Lidars, celles-ci peuvent être compensées par la photogrammétrie. Mais l'utilisation des deux méthodes de SLAM ne garantit pas nécessairement un bon résultat car certains environnements posent des problèmes aux deux méthodes, comme :

- des surfaces transparentes ;
- des surfaces fort réfléchissantes ;
- des espaces très uniformes sans variation de couleur, ni de forme.

Ces conditions rendent la recherche de points communs très difficile (Poux, 2019).

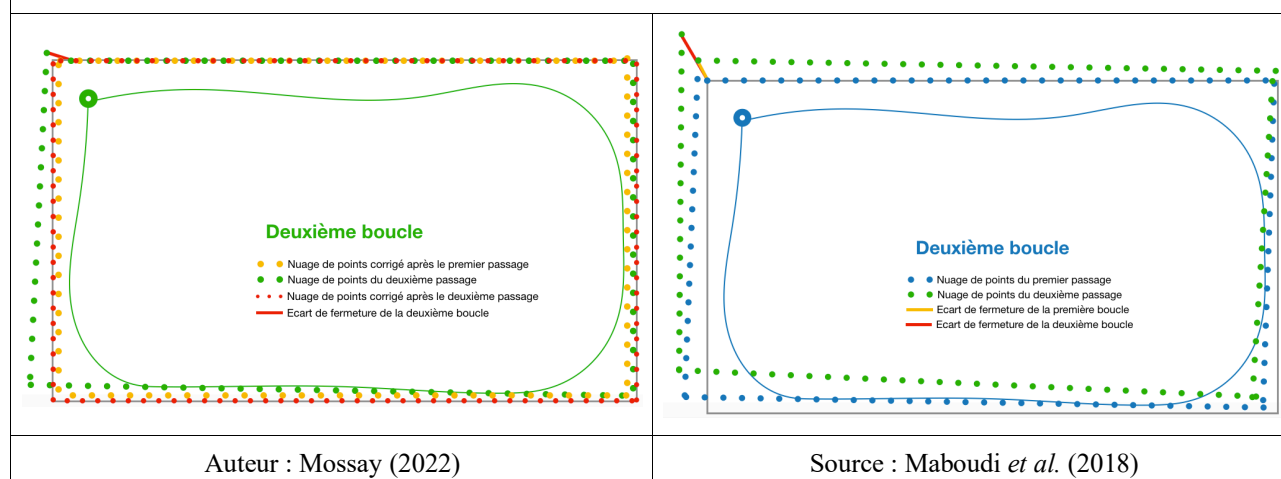
Il faut cependant prendre en compte que si le fonctionnement du SLAM est globalement identique, il s'agit de systèmes utilisant des logiciels et algorithmes différents. Il s'agit d'une technologie complexe en perpétuel développement et les méthodes varient et évoluent pour faciliter l'utilisation et améliorer la précision. Il existe aussi de nombreuses différences en fonction de l'application. Par exemple, des méthodes optimisées pour des relevés en intérieur ne sont pas bien adaptées pour des relevés en extérieur (Durrant-Whyte *et al.*, 2006 ; Cadena *et al.*, 2016).

Les différents systèmes dépendent de beaucoup de facteurs et il est souvent difficile de savoir quel SLAM est utilisé dans une machine. Pour les opérateurs, il est d'autant plus difficile de connaître les différences entre ces systèmes variés. Dans le cadre de ce mémoire, cette partie ne sera pas plus approfondie car l'analyse se fera avec un instrument donné et il n'est donc pas possible pour l'opérateur d'avoir une influence sur le système SLAM appliqué par la machine. Il faut tout de même préciser que le Leica BLK2GO utilisé pour les mesures de ce mémoire, ne permet pas de réaliser des boucles (Van Genechten, 2022). Pourtant, certains systèmes permettent de reconnaître des endroits déjà numérisés et de venir raccrocher les nouvelles mesures sur les anciennes. Cette méthode permet donc de réaliser des boucles ce qui peut considérablement améliorer la qualité finale du nuage de points (Maboudi *et al.*, 2018).

Tableau 1 : Fonctionnement théorique des boucles

SLAM avec boucles	SLAM sans boucle
<i>Figure 1 : Boucle non fermée</i>	
<i>Figure 2 : 1 boucle</i>	

Figure 3 : 2 boucles



Avec les deux types de SLAM, la première étape (Figure 1) est identique. Si la boucle n'est pas fermée, un éventuel décalage peut être constaté, la différence est visible lorsque la boucle est fermée. Dans ce cas, le SLAM est capable de prendre en compte les boucles et compense les points relevés sur la distance parcourue afin de réajuster le nuage de points. Pour les SLAM, qui ne sont pas capables de prendre en compte les boucles, le laserscan les considère comme des nouveaux points. S'il n'y a pas d'erreur, les nouveaux points se superposent aux anciens et densifient le nuage de points. Au contraire, s'il existe une erreur, même légère, le laserscan numérise une deuxième fois une même géométrie, mais avec un décalage. En théorie, pour les laserscans capables de prendre en compte des boucles, plus le nombre de tours augmente et plus la qualité du nuage de points final augmente. Alors que pour les autres SLAMs, plus le nombre de tours réalisés augmente et plus, une même géométrie sera relevée avec un décalage se déplaçant de plus en plus par rapport à la réalité à cause de la propagation des erreurs (Figure 3).

L'intérêt des boucles est donc de réajuster le nuage de points relevé, ainsi que de densifier le nuage de points final. Cependant, l'utilisation des boucles ne permet pas forcément de s'approcher au mieux de la situation réelle. Lors de la compensation des boucles, tout le nuage de points est compensé en fonction de la distance parcourue sans savoir si l'erreur est due à une propagation d'erreurs ou due à une erreur de manipulation. Dans le cas où une erreur de manipulation serait commise en fin de boucle, tout le nuage de points serait compensé en l'induisant en erreur (Van Genechten, 2022).

2.1.5 Building Information Modeling (BIM)

Un des domaines d'application, dans lequel l'intérêt des MLS est particulièrement important, est celui de la construction et plus particulièrement, celui de la modélisation des bâtiments avec toutes leurs caractéristiques (BIM). Etant donné que le relevé de données rapide peut se réaliser avec peu

d'occlusions des scanners mobiles, ces derniers deviennent très intéressants pour numériser des bâtiments. Ces données peuvent ensuite être exploitées dans différents secteurs tels que l'architecture, l'ingénierie, etc. (Hübner *et al.*, 2021).

Le terme BIM est actuellement assez mal connu et sa compréhension dépend souvent de l'application dans les différents domaines de l'architecture et de l'ingénierie. Certains domaines considèrent l'acronyme BIM pour les termes "Building Information Modeling" et d'autres pour "Building Information Management". Les deux partent du même principe, c'est-à-dire qu'il faut numériser des bâtiments en trois dimensions afin d'obtenir des plans détaillés qui peuvent ensuite être utilisés par différents corps de métier (Barnes *et al.*, 2015 ; Diaz-Vilarino *et al.*, 2018).

Le principe du BIM est de projeter des plans de bâtiment en trois dimensions au lieu de deux, comme c'est souvent le cas actuellement. L'intérêt est d'avoir une meilleure perception de l'espace et de pouvoir y joindre des informations primordiales pour certains corps de métier. Ainsi, les informations fournies par des BIM peuvent aider :

- à déterminer des caractéristiques techniques et de stabilité ;
- à prédire différents coûts en terme d'énergie et d'aménagement ;
- à faciliter le travail lors de travaux au sein de la construction.

L'intérêt du BIM est de stocker un grand nombre de données afin de simplifier l'utilisation pour tout le monde. Ce principe s'applique actuellement aux nouvelles constructions mais des techniques de TLS et MLS permettent également de numériser des constructions déjà existantes. Les méthodes scan 3D sont donc très intéressantes car elles fournissent de très bonnes données sur la structure de l'ensemble d'un bâtiment (Karen *et al.*, 2014 ; Issa *et al.*, 2015).

2.2 Pourquoi comparer un TLS et un MLS ?

2.2.1 Comparaison Terrestrial and Mobile Laser Scanners (TLS vs MLS)

D'un point de vue général, les TLS ont une meilleure précision que les MLS. La première raison se base sur la stabilité des instruments, les TLS restent plus stables lors de la prise de mesure et nécessitent moins de compensateurs que le MLS qui, par définition, est en mouvement. Deuxièmement, les deux scanners peuvent utiliser le "cloud to cloud" pour raccrocher plusieurs nuages de points entre eux. Le "cloud to cloud" consiste à comparer un nuage de points avec un autre et permet soit d'en déterminer les différences, soit, comme dans le cas présent, de trouver des géométries similaires pour pouvoir raccorder les nuages entre eux le plus précisément possible. La différence entre les deux méthodes est donc à l'avantage des TLS qui sont plus précis. En effet, les MLS se raccrochent en permanence aux données qui viennent d'être acquises, ce qui induit deux problématiques. La première est que cette méthode accentue le risque d'une importante propagation d'erreurs. En effet, aucun raccord entre deux nuages de points n'est parfait et donc chaque raccord induit une petite erreur. La seconde est qu'il n'est pas possible d'évaluer la qualité du raccord entre deux nuages de points successifs par "cloud to cloud" (Maboudi *et al.*, 2017).

L'avantage essentiel qu'apportent les MLS par rapport aux TLS se rencontre principalement en intérieur ou dans des espaces restreints avec beaucoup d'objets fixes. Les MLS peuvent aussi être utilisés en extérieur mais leur précision diminue fortement. En intérieur, les MLS sont très maniables et permettent donc de scanner facilement un bâtiment dans sa totalité. Cet aspect est particulièrement intéressant dans des petits espaces restreints et difficilement accessibles tels que dans des anciens bâtiments historiques. De manière plus globale, la précision est fortement liée à la distance des objets mesurés. Plus la distance est grande et plus le risque d'imprécision est important. La rapidité de l'acquisition et des traitements des données en fait un atout intéressant. La qualité des nuages de points obtenus est en principe suffisamment précise pour des utilisations dans l'architecture. Mais pour plus de détails et de précision, les TLS restent la technique préconisée (Sammartano *et al.*, 2018).

Même si les TLS fournissent des nuages de points de bonne qualité, la collection des données nécessite une bonne planification et prend beaucoup de temps. Cette situation s'empire tant en intérieur que dans des espaces restreints. Dans de tels environnements, il faut, généralement, un très grand nombre de stations et le risque d'occlusions est important car il est souvent difficile de tout scanner. C'est principalement dans de tels environnements que les MLS apportent le plus grand intérêt. Les MLS permettent de se déplacer librement et donc de scanner des espaces complexes en continu mais il faut que la trajectoire soit connue. La précision est généralement moindre avec les

MLS mais ils présentent souvent moins d'occlusions que les TLS. En intérieur, le suivi par GNSS ne fonctionne généralement pas. Ainsi, il est essentiel d'utiliser d'autres méthodes de suivi de la trajectoire comme le SLAM (Lethola *et al.*, 2017).

La géométrie des pièces peut aussi affecter les résultats. Des surfaces droites et uniformes ne permettent pas au système SLAM de bien se repérer, par conséquent, il est fréquent que des déviations se produisent dans les nuages de points finaux. Ces déviations peuvent rapidement prendre de l'ampleur à cause de la propagation d'erreurs et il n'est pas rare d'observer des déviations allant jusqu'à quelques mètres (Sammartano *et al.*, 2018 ; Van Genechten, 2022).

Des techniques pour améliorer la qualité du relevé existent avec des MLS. Par exemple, certains SLAMs peuvent réaliser des boucles en repassant plusieurs fois par un même endroit. Cette technique permet au SLAM de se repérer et de mieux recalculer sa position (Sammartano *et al.*, 2018). Des essais ont été réalisés dans ce domaine en testant sur un même site plusieurs scénarios, concrètement, différents tracés ont été réalisés avec ou sans boucle. L'expérience a montré que la précision augmente fortement avec le nombre de boucles. Cependant, il n'est pas impossible d'avoir des résultats similaires avec une seule boucle. Ceci met en évidence que la qualité du nuage de points dépend également du maniement de l'appareil par l'opérateur (Maboudi *et al.*, 2018). Néanmoins, il ne faut pas oublier que tous les SLAMs ne sont pas capables d'"interpréter" des boucles. Dans ce cas, le SLAM n'est pas non plus capable de superposer et de compenser les nuages de points lors de passages successifs (Van Genechten, 2022).

Il existe néanmoins des limites aux deux instruments. Une faiblesse de l'ensemble des laserscans, TLS ou MLS, provient de l'influence des surfaces réfléchissantes et transparentes sur les mesures. Cependant, cette faiblesse ne se limite pas seulement aux laserscans, elle pose aussi de nombreux problèmes pour les stations totales et la photogrammétrie. En effet, ce type de surface induit de la réfraction et de la réflexion, ainsi, ces surfaces peuvent ne pas être perçues, être mesurées avec un léger décalage, en créant un "bruit", ou encore créer des "ghost walls". Ce dernier résultat correspond à des géométries créées dans le nuage de points aux mauvais endroits. Il est nécessaire de détecter et de se débarrasser de ces fausses géométries lors du nettoyage des nuages de points, afin de ne pas introduire des valeurs erronées dans les traitements ultérieurs. Ces géométries peuvent facilement être supprimées lorsqu'elles sont représentées à l'extérieur du vrai scan. Toutefois, il est plus difficile de les éliminer lorsque celles-ci sont à l'intérieur du bon nuage de points. En effet, à l'intérieur du nuage, elles peuvent souvent créer un "bruit". Le terme "bruit" désigne ici un amas de points moins denses qui rend la détection des vraies formes d'une géométrie difficile et qui peut induire une erreur lors

des traitements (Nikooheemat et al., 2018 ; Poux, 2019). Cunha et al. (2022) proposent une solution simple contre les surfaces réfléchissantes et transparentes en utilisant un spray qui étale une poudre opaque sur ces surfaces. Cependant, tel que précisé dans la section consacrée aux SLAM, certains systèmes utilisent entre autres de la photogrammétrie, qui s'en trouverait fortement handicapée pour des mesures en intérieur. Avec l'utilisation du spray, il n'y aurait plus que très peu voir aucune lumière naturelle qui éclairerait la zone de mesure.

Tableau 2 : synthèse de la comparaison entre TLS et MLS

Critères de comparaison	TLS	MLS
Précision	++	-
Temps de prise de mesure	--	++
Suivi de la trajectoire	- ou ++ (dépend du TLS)	++
Application avec le GNSS	++	++
Intérieur / espace restreint	-	++
Extérieur	++	-
Améliorations possibles avec SLAM (ou logiciel similaire)	++	++

2.3 Comment comparer un TLS et un MLS ?

2.3.1 Méthodes de comparaison

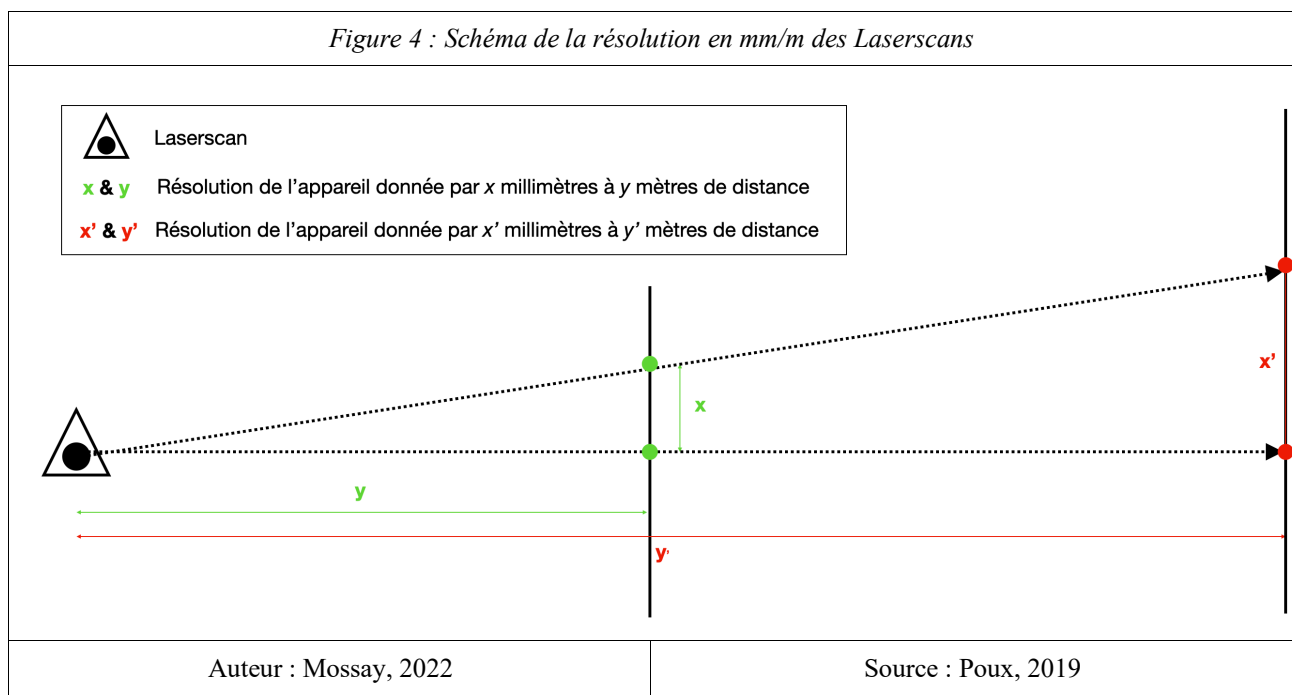
Le but des méthodes de comparaison entre un TLS et un MLS est de déterminer et de quantifier la différence entre les deux nuages de points. Il existe plusieurs possibilités pour comparer des nuages de points. La première correspond à la comparaison visuelle, qui s'apparente à la première impression de l'opérateur en observant deux nuages de points. Il s'agit d'une comparaison purement objective de la part de l'utilisateur mais elle permet généralement de donner un premier avis sur la résolution et la finition des nuages de points. La seconde méthode permet d'approfondir la comparaison en observant la qualité globale et la précision des nuages en utilisant les géométries de ces nuages.

2.3.2 Comparaison qualitative

Cette comparaison dépend principalement des instruments eux-mêmes et de la manière dont ils sont utilisés. Un instrument avec une meilleure résolution est capable de faire des nuages plus complets. Néanmoins, sur la plupart des scanners, il est possible de choisir entre différentes résolutions qui

permettent de numériser plus ou moins de points par scan en fonction de l'utilisation. L'avantage principal de pouvoir choisir entre plusieurs résolutions correspond à la variation de la vitesse de mesure et la taille des fichiers sortant. Ainsi, selon l'application souhaitée, il est possible de choisir une résolution préférentiellement à une autre (Poux, 2019).

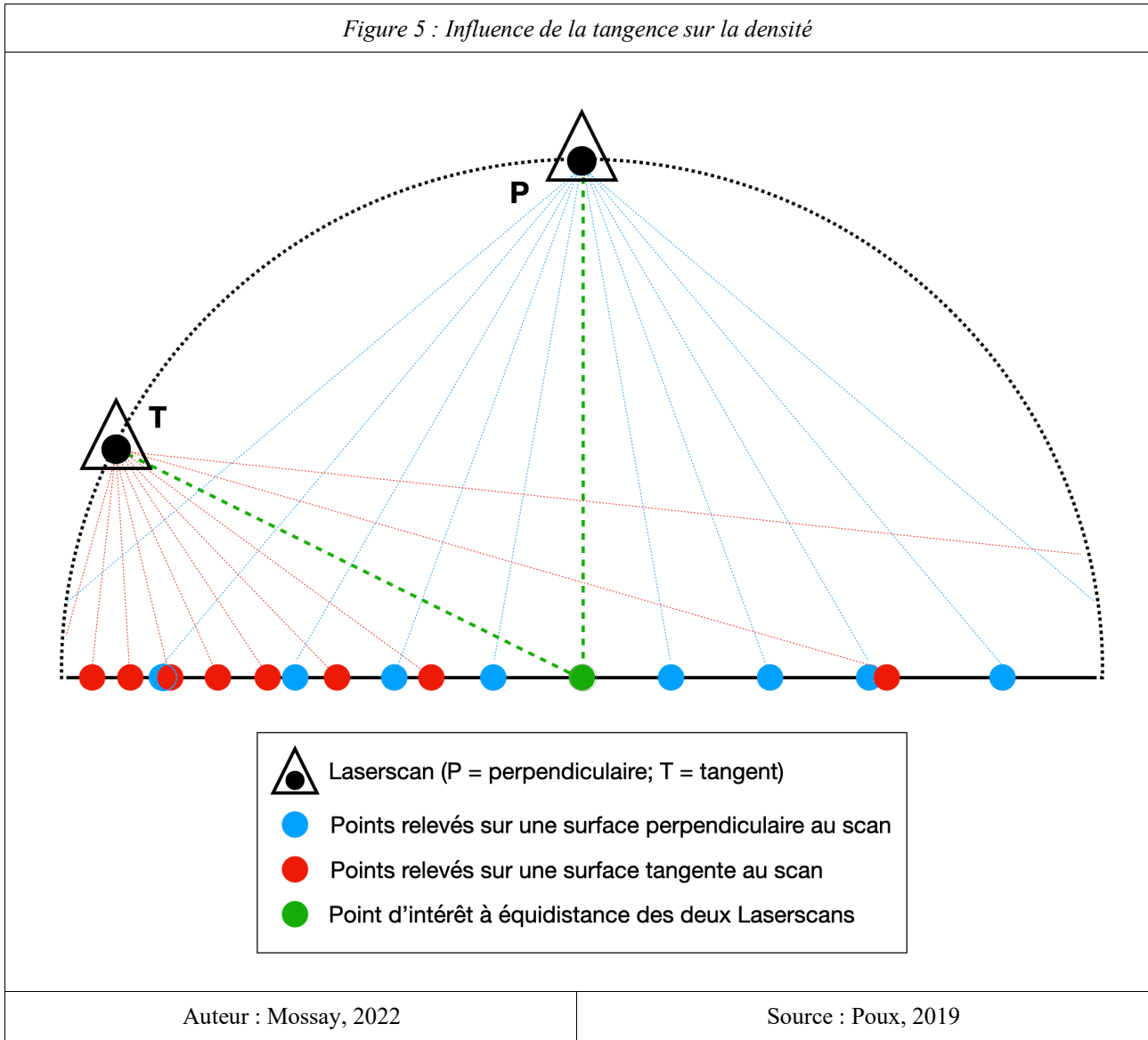
De manière générale, l'aspect visuel varie donc essentiellement selon la densité des nuages. Celle-ci est principalement dépendante de la résolution utilisée mais aussi de l'environnement et de la distance entre les scanners et les objets à numériser. C'est pour cette raison que la résolution des laserscans est majoritairement donnée en x mm pour une certaine distance y m. Pour cette distance y , il y aura donc un point tous les x mm. Ainsi, plus la distance entre le scanner et l'objet est grande, c'est-à-dire plus l'utilisateur s'éloigne, et plus la distance x entre les points augmente (Figure 1).



Ce schéma (Figure 4) montre que la densité de points d'un scanner, fournie en millimètres à une certaine distance y ou y' , varie avec cette même distance.

Cependant, il faut préciser que ce rapport dépend de plusieurs autres aspects. Premièrement, le rapport est considéré pour une surface perpendiculaire au scanner. Ainsi, si l'angle entre une surface et le scanner change, la résolution sera fortement modifiée. La tangence et la distance entre le scanner et les points ont donc une très grande importance en ce qui concerne la densité de points, comme il est possible de le constater sur le schéma suivant (Figure 5).

Figure 5 : Influence de la tangence sur la densité



Ce schéma (Figure 5) représente deux scanners à équidistance d'un même point où l'angle entre deux mesures successives est identique pour chaque mesure des deux laserscans. Considérant le point central (vert) comme point d'intérêt du scanner, il est possible de démontrer l'influence de la position de chaque scanner par rapport à la surface. Pour les points mesurés par le *scanner P*, la densité est satisfaisante tout autour du point d'intérêt sur la surface. Pour les points mesurés depuis le *scanner T*, la densité est très importante dans la zone de faible distance entre le laserscan et la surface, cette densité de points s'affaiblit autour du point d'intérêt et devient très faible passé ce point avec la distance qui augmente par rapport à la surface mesurée.

Néanmoins, il ne faut pas oublier qu'un laserscan ne permet pas de mesurer un point en particulier, comme le fait une station totale. Le laserscan mesure une multitude de points avec une densité théorique. En pratique, il est donc fort improbable qu'une mesure relève précisément ce point central. Cependant, la probabilité qu'un des points mesurés par le *scanner P* corresponde au point d'intérêt

est plus grande que la probabilité qu'un des points mesurés depuis le *scanner T* coïncide à ce point. Ainsi, l'angle du scanner par rapport à une surface peut avoir une influence sur la précision de la mesure. Par exemple, dans le cas où ce point d'intérêt serait un objet à numériser, il est plus intéressant d'utiliser un scanner perpendiculaire à la surface, car la densité autour de ce point central est plus importante et le rendu visuel en sera meilleur (Figure 5).

En résumé, plusieurs facteurs peuvent influencer la résolution selon l'instrument utilisé, soit un TLS soit un MLS. Pour les TLS, la densité de points dépend, en plus de la résolution choisie, de la distance et des angles d'incidence, du nombre de stations, de la distance entre celles-ci et de la répartition de celles-ci dans l'espace. Dans le cas des MLS la densité dépend aussi de la résolution de l'appareil, de la distance et des angles d'incidence mais également de la vitesse d'avancement et du parcours que fait l'opérateur dans l'espace. Plus l'utilisateur se déplace rapidement et moins la résolution sera importante (Poux, 2019).

2.3.3 Comparaison quantitative

L'évaluation des nuages de points par la méthode de comparaison quantitative peut se faire selon deux approches différentes. Il est possible de comparer des points individuels spécifiques entre eux ou de comparer directement des nuages complets ou partiels.

2.3.3.1 Par points spécifiques

L'intérêt de cette méthode est d'évaluer une éventuelle distorsion de la géométrie sur la base de points précis dont les coordonnées sont connues (dans un système local ou global). Cette méthode permet de réaliser des mesures très précises sur des points bien spécifiques et permet donc d'évaluer une éventuelle déformation des nuages de points sur la base de ces résultats.

a. Points to points distance

Le but de cette méthode consiste à comparer des points de contrôle au sein du nuage, ceux-ci étant relevés à l'aide d'une station totale. Les mesures réalisées par la station totale servent de référence car il s'agit de l'appareil présentant les meilleures précisions de mesures. L'avantage des stations totales est le contrôle aisé de la qualité de ces mesures et l'affranchissement de la plupart des erreurs liées à la machine en appliquant un double retournement et un tour d'horizon (Billen, 2021). Ensuite, les distances entre les points de contrôle sont mesurées pour chaque nuage de points et comparées aux résultats obtenus par la station totale. Si ces points de contrôle sont correctement répartis, cette méthode permet de vérifier la géométrie globale de la zone (Lethola *et al.*, 2017).

Comme points de contrôle, il est aussi possible d'utiliser des cibles qui peuvent généralement être automatiquement reconnues par les logiciels de traitement des nuages de points. Dans le cas contraire, l'opérateur doit choisir manuellement des points ce qui peut engendrer une incertitude (Maboudi *et al.*, 2018).

Un autre intérêt des stations totales très intéressant, qui s'applique essentiellement aux scans en extérieur, est qu'il est possible, si les conditions le permettent, de mesurer des points au GNSS. De cette manière, il devient facile de géoréférencer le nuage de points et d'en déterminer les coordonnées dans un système de référence. Cette méthode présente donc de nombreux avantages, notamment dans l'utilisation des BIM (Cunha *et al.*, 2021).

b. Model-based evaluation

Cette méthode consiste à comparer les résultats des scans avec des mesures simples réalisées sur le terrain à l'aide d'un mètre ruban ou d'un télémètre. L'objectif est de comparer la fiabilité du nuage de points de manière simple et rapide. Dans de nombreux domaines, de simples mesures au télémètre sont utilisées pour réaliser des modélisations en intérieur. Ces mesures sont moins précises et beaucoup plus susceptibles de subir des erreurs de manipulation de l'utilisateur. Ces mesures au télémètre sont utilisées pour réaliser un plan grossier d'un bâtiment reprenant des cotes de longueur, largeur et hauteur des différentes géométries. Ensuite, une coupe horizontale est réalisée dans le nuage de points afin d'obtenir un plan 2D similaire. Il est donc possible de comparer les différentes cotes sur le plan et sur la coupe du nuage de points. Cette méthode ne permet pas de faire une analyse poussée des résultats. Mais elle permet de voir rapidement s'il existe une distorsion ou des erreurs importantes sur le nuage de points. L'avantage principal de cette méthode est qu'elle permet à l'opérateur de rapidement et facilement contrôler son travail, et ce, même si elle ne permet pas vraiment de quantifier, ni d'analyser précisément les erreurs. Dans la pratique, un opérateur utilise rarement plusieurs techniques différentes pour relever un même site dans le but de contrôler le résultat obtenu. Néanmoins, utiliser cette méthode permettrait à l'utilisateur un premier contrôle rapide et facile à effectuer directement sur le terrain (Maboudi *et al.*, 2018).

2.3.3.2 Comparaison de nuages

Alors que la comparaison des points spécifiques ne confronte que quelques points bien précis, la comparaison de nuages rapproche des nuages de points entiers entre eux. Cette méthode présente des

avantages comme des inconvénients par rapport à la méthode des points spécifiques. Un inconvénient est que, de manière générale, cette méthode est beaucoup plus sensible au bruit du nuage de points, qui peut entraîner des approximations dans les résultats finaux. De plus, le nettoyage et la densité de tous les nuages représente également un aspect très important pour ces techniques. Si le nuage de référence manque de densité en certains endroits, cela peut induire une différence entre les nuages de points qui n'est pas due à une erreur de mesure mais à un manque de données. Ou encore si les nuages de points n'ont pas été correctement nettoyés certains points qui n'ont rien à faire avec la zone à comparer peuvent être pris en compte dans les mesures et induire une erreur au niveau de la moyenne. Les avantages par rapport à la méthode des points spécifiques sont que dans ce cas-ci, l'ensemble des points est considéré et qu'il est plus simple de visualiser certaines erreurs de manière globale. De plus, certaines erreurs locales peuvent être prises en compte alors que par la méthode des points de référence, il est difficile de dire si une erreur est locale ou s'il s'agit d'une distorsion globale.

2.3.3.2.1 Cloud to cloud distance (C2C)

Pour cette comparaison les nuages de points obtenus par TLS et par MLS sont directement comparés les uns aux autres. Dans ce cas, le nuage de points obtenu par TLS est utilisé comme référence. Même si ce dernier est potentiellement entaché d'erreurs, il est supposé être plus précis que le nuage obtenu par MLS. Les deux nuages sont alignés les uns aux autres par une transformation Helmert. Ensuite, la distance entre un point du nuage par MLS et le point le plus proche du nuage par TLS est calculée par un algorithme ICP (iterative closest point), qui reproduit l'opération pour l'ensemble des points du nuage MLS. Le résultat permet de déterminer des potentiels écarts et de chiffrer ceux-ci entre les deux nuages. Cette méthode favorise une comparaison directe entre deux nuages de points bruts. Comme il est possible de quantifier l'écart entre les deux nuages de points, il est également possible de déterminer certains endroits en particulier où la déformation est la plus importante (Lethola *et al.*, 2017 ; Maboudi *et al.*, 2018).

Dans certains rapports, une autre méthode dérivée du cloud to cloud, appelée "Multiscale Model to Model Cloud Comparison algorithm" (M3C2) est utilisée. Son fonctionnement consiste également à créer des surfaces sur base du nuage de points de référence mais en utilisant seulement un échantillon de points du nuage. Cette méthode permet de réaliser des traitements beaucoup plus simples et plus rapides. Un autre avantage est que le nuage de points ne doit pas être soumis à un maillage et peut de ce fait éviter certaines approximations. Ce plugin permet aussi de déterminer manuellement une distance maximale tolérée pour comparer deux points (Tucci *et al.*, 2018).

2.3.3.2.2 Point to plane distance

Cette méthode consiste à comparer des nuages de points à des surfaces créées à partir d'un nuage de points de référence. Dans ce cas aussi, le nuage de points mesuré par le TLS est utilisé comme nuage de référence. Suivant le même principe que pour la méthode des cloud to cloud distance, les distances entre les points du nuage mesurés par MLS et les surfaces créées sur base du nuage par TLS sont calculées. Cette méthode présente plusieurs avantages et inconvénients. D'une part, un inconvénient provient du fait qu'un des deux nuages de points est manipulé avant la comparaison ce qui pourrait entraîner des erreurs. D'autre part, cette méthode permet de comparer correctement les deux nuages et ce, même si, le nuage de référence présente des faibles densités de points par endroit (Maboudi et al., 2018). Par exemple, comme expliqué précédemment, il est possible que des nuages de points mesurés par TLS soient moins denses par endroits en raison de leur difficulté de maniement dans des espaces restreints. Dans ce cas, la méthode de comparaison par cloud to cloud distance pourrait afficher une erreur importante car, si la densité de points est faible, la distance entre deux points à proximité est en principe plus grande. Il se pourrait donc qu'une mauvaise interprétation soit réalisée, alors qu'en utilisant la méthode "Point to plane distance", cette fausse interprétation peut être évitée car les surfaces sont calculées pour tout endroit du nuage de points quelle que soit la densité. Néanmoins, dans ce cas, la surface en elle-même risque d'être plus entachée d'erreurs car elle a été déterminée sur la base d'un plus petit nombre de points. Mais en ce qui concerne la comparaison entre la surface et le nuage déterminé par MLS, le résultat devrait être plus significatif que pour la méthode précédente. Il peut donc être intéressant de combiner les différentes méthodes, afin d'éviter des erreurs d'interprétations. Un autre aspect intéressant est qu'il est possible de déterminer des histogrammes d'erreurs sur la base des résultats obtenus. L'obtention d'une distribution normale de l'histogramme indiquerait que les différentes erreurs sont aléatoires. Dans le cas de l'obtention d'une autre distribution sur l'histogramme, il serait possible de déterminer l'influence d'une autre erreur grossière ou systématique (Maboudi *et al.*, 2018).

Le cloud to mesh (C2M) fonctionne de manière similaire en créant des surfaces mais la différence réside dans le fait qu'il ne s'agit pas d'une surface calculée sur la base d'une moyenne des différents points mais sur la base d'un maillage qui connecte le point avec ses plus proches voisins. Le résultat n'est donc pas une surface parfaitement lisse mais une multitude de triangles qui forment une géométrie qui suit au mieux la position réelle des points. Sur le logiciel de traitement "CloudCompareTM" il est facile de créer ces maillages et de calculer la distance entre les points du nuage à comparer et le triangle le plus proche du maillage formé à partir du nuage de référence (Tucci *et al.*, 2018).

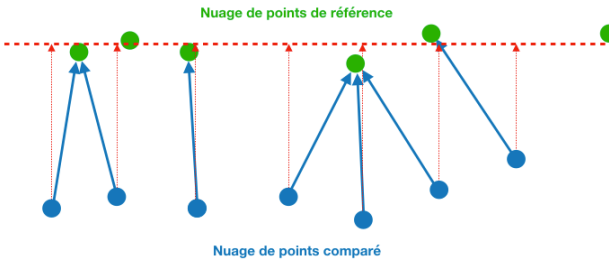
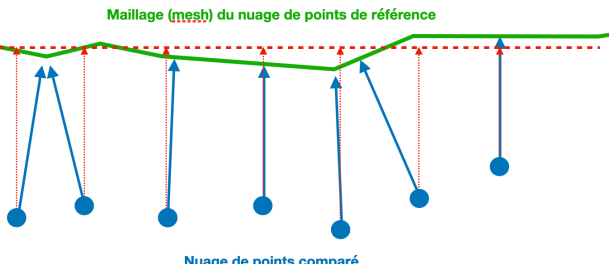


2.3.3.2.3 Mesh to mesh distance (surface to surface)

La méthode des mesh to mesh compare directement deux maillages entre eux. Pour cela le nuage de points de référence, comme le nuage de points à comparer subissent un traitement qui crée un maillage. Ensuite, les distances entre les deux maillages sont mesurées (Antova, 2019).

2.3.3.3 Récapitulatif

Dans le tableau ci-dessous (Tableau 3), sont représentés les schémas du fonctionnement théorique des différentes méthodes évoquées précédemment :

Tableau 3 : Schémas récapitulatifs des différentes techniques de comparaison de nuages de points

<p>Figure 6 : Cloud to cloud (méthode des plus proches voisins)</p>	<p>Figure 7 : Cloud to mesh</p>
	
<p>Figure 8 : Cloud to surface</p>	<p>Figure 9 : Mesh to mesh</p>
	
<p> - - - Surface "réelle" - - - Distance à la surface "réelle" —> Distance aux points/surfaces mesurée </p> <p style="text-align: center;">Auteur : Mossay (2022)</p>	

D'un point de vue général, la méthode des "cloud to cloud" semble donner des valeurs avec un plus gros risque d'erreur mais en fournissant directement les distances entre les deux points les plus proches. La méthode des "cloud to surface" semble donner les meilleurs résultats mais elle simplifie fortement la géométrie du nuage de points et risque d'effacer certaines variations ou détails d'une surface. De plus, la surface calculée peut avoir subi une déviation par rapport à la surface supposée "réelle" (Annexe 1). La méthode des cloud to mesh semble donc à priori donner un bon compromis entre la méthode des "cloud to cloud" et "cloud to surface". La méthode des "mesh to mesh" fournit

également des résultats intéressants mais nécessite de lourds traitements sur le nuage de référence et le nuage à comparer.

Chapitre 3. Hypothèses de recherche

Au travers de la revue de la littérature, il est possible de constater l'intérêt grandissant actuellement pour les laserscans en particulier dans le domaine de la construction et pour tous les métiers s'en rapprochant. En effet, les scanners permettent de réaliser facilement et rapidement des représentations en trois dimensions qui peuvent être utilisées à différents égards.

Ainsi, ces instruments sont de plus en plus utilisés et donc en constante évolution pour développer des instruments qui correspondent au mieux au marché. Les acteurs du bâtiment, utilisant la reconstruction 3D ou non, courent après le temps lors de toutes leurs prises de mesures, ils remplissent une multitude de tâches différentes qui sont souvent chronophages. Actuellement, ces utilisateurs recherchent des méthodes qui augmentent la vitesse de la réalisation de certaines tâches, comme le dessin assisté par ordinateur a pu diminuer le temps de réalisation des plans. La modernisation et la sophistication des instruments ont amélioré grandement la vitesse de la prise de mesure tout en en améliorant la précision. L'évolution constante des instruments de prise de mesure concerne aussi les instruments de reconstruction 3D. En effet, l'utilisation des « Terrestrial Laser Scanners » prend actuellement toujours beaucoup de temps pour réaliser un scan 3D précis et complet, par conséquent, le développement des « Mobile Mapping Systems » prend tout son sens au vu de la rapidité de la prise des mesures avec ce système. Cependant, ce nouvel instrument promet la rapidité recherchée par les corps de métier mais il est encore plus crucial pour ces métiers de respecter la précision demandée dans leur domaine d'activités et par le cahier des charges de leurs missions. Cet instrument mobile de représentation 3D amène donc une rapidité mais il reste une inconnue concernant sa qualité et sa précision.

L'intérêt de ce mémoire réside dans la comparaison des laserscans les plus souvent utilisés dont la qualité a été prouvée, les TLS, et les laserscans mobiles qui sont en train de se développer et permettent un gain de temps considérable mais dont la qualité évolue constamment et qui n'a été que peu étudiée jusqu'à présent. La question de recherche est donc la suivante :

“La précision des MLS actuels est-elle suffisante pour l'utilisation dans le domaine du bâtiment et de la reconstruction 3D par rapport aux instruments actuellement utilisés, les TLS et est-il possible d'améliorer cette précision ? “

Pour l'utilisation dans le domaine de la construction, aucune norme officielle n'a été identifiée dans la littérature. Ainsi, la tolérance est fixée arbitrairement à un centimètre, ce qui semble être une valeur acceptable dans le domaine de la construction.

Certains paramètres influencent directement la prise de mesure et, par conséquent, sa qualité. Dans la littérature, il est possible d'en identifier trois très importants qui ont une réelle influence sur le résultat final :

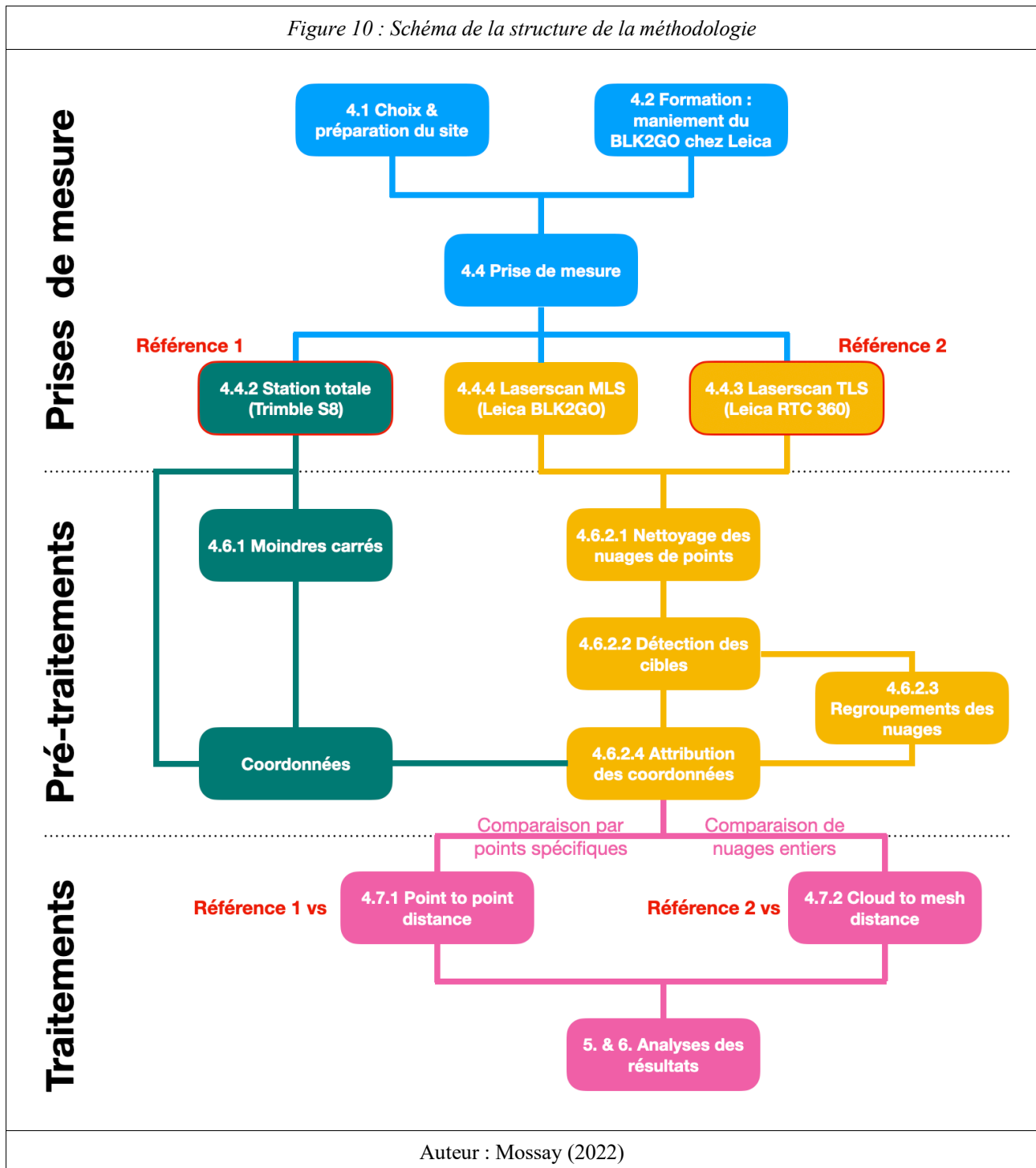
- L'environnement : a une influence directe sur la qualité et la précision ;
- La distance parcourue : plus elle est importante et plus la précision sera altérée ;
- L'application de méthodes de mesures comme la réalisation de boucles : permet de réduire la variance des mesures et donc d'améliorer la précision.

Ces paramètres ont été pris en compte lors de la réalisation des mesures pour pouvoir comparer les deux instruments sans que leurs résultats finaux ne soient influencés par ces paramètres extérieurs.

Pour tester les hypothèses émises, une méthodologie de travail a été mise en place comme expliqué au chapitre 4. Cette méthodologie permet de maintenir une homogénéité dans les différents traitements appliqués pour la totalité des nuages de points. De plus, deux campagnes de mesures ont été réalisées en suivant la même méthodologie. La première servant à déterminer les paramètres adéquats afin d'obtenir les meilleurs résultats possibles pour comparer le MLS avec le TLS. Et la seconde servant de contrôle des résultats obtenus lors de la première campagne ainsi qu'à analyser d'éventuelles évolutions de l'instrument de mesures.

Chapitre 4. Méthodologie

Figure 10 : Schéma de la structure de la méthodologie



Auteur : Mossay (2022)

La partie méthodologie comprend les différentes étapes qui ont été effectuées pour pouvoir répondre à la question de recherche et pouvoir comparer les TLS et MLS. Tout d’abord, il a fallu déterminer le site d’analyse, le matériel et les logiciels utilisés. Ensuite, la prise de mesure a été réalisée. À la suite de la prise de mesure, il a été nécessaire d’effectuer des pré-traitements, un cheminement à la station totale et un nettoyage des nuages de points. Enfin, deux traitements ont été exécutés comme

présentés dans la littérature : point to point et cloud to mesh. Ces traitements permettent de récupérer des distances entre des points de nuages différents. Pour finir, ces données ont été comparées au travers de valeurs statistiques (moyennes, écart-types et intervalles de confiance) afin d'analyser la précision obtenue avec les deux instruments.

4.1 Site d'analyse

Pour comparer les instruments de prise de mesure, les analyses portent sur un relevé à l'intérieur d'un bâtiment. Le bâtiment en question est le bâtiment B5b de la faculté de physique de l'Université de Liège sur le campus du Sart-Tilman. Cet endroit a été sélectionné pour diverses raisons :

1. Il permet de réaliser des essais sur plusieurs étages ;
2. Proximité du local de topographie du département de Géomatique de l'Université de Liège ;
3. Longs couloirs avec des laboratoires et des escaliers aux deux extrémités ;
4. Possibilité de faire des boucles à travers le bâtiment pour revenir au point de départ ;
5. Possibilité de réaliser des visées vers l'extérieur pour le cheminement à la station totale ;
6. Beaucoup de surfaces différentes (entre autres : du bois, du calcaire de type pierre bleue, du métal peint, du métal brossé) permettant d'analyser un peu l'impact de différents types de surfaces.

4.2 Formation au maniement du BLK2GO

Avant le prêt de l'appareil, la société Leica a organisé, à l'aide du promoteur, une petite journée d'apprentissage pour utiliser au mieux la machine et éviter des erreurs dues à des mauvaises manipulations. Cette journée dans les locaux de Leica à Bruxelles avait pour but d'expliquer le fonctionnement du BLK2GO (MLS) et de montrer les bonnes pratiques d'utilisation du laserscan. Une courte présentation expliquant les détails techniques du BLK2GO et du logiciel Cyclone Register 360, a permis de se familiariser avec ce nouvel environnement. Ensuite, un petit essai a été organisé au sein des locaux de la société Leica, afin de montrer les difficultés et les bonnes pratiques pour réaliser des scans en intérieur.

Tableau 4 : Schémas descriptifs des managements du BLK2GO (MLS)

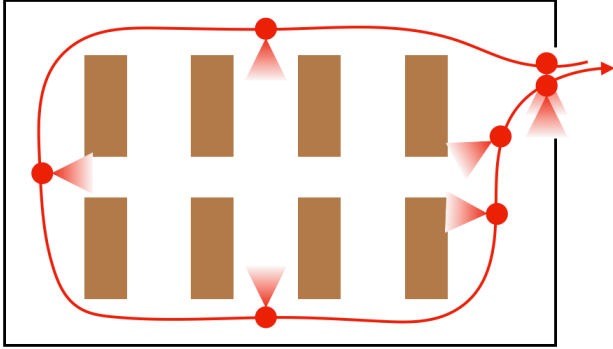
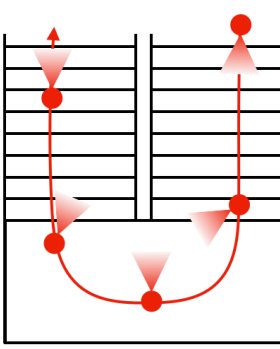
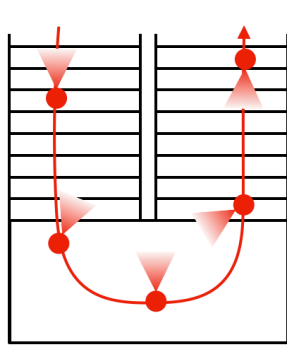
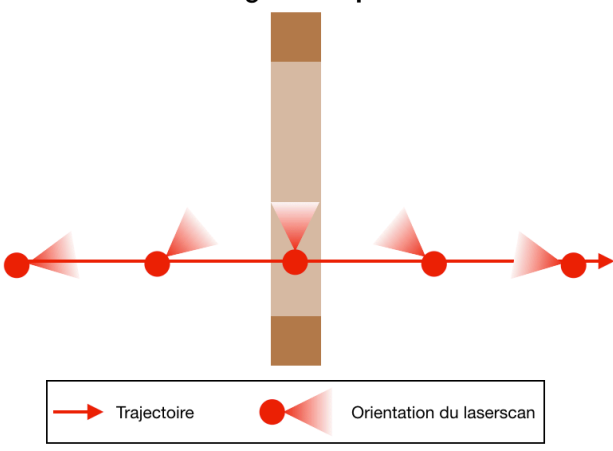
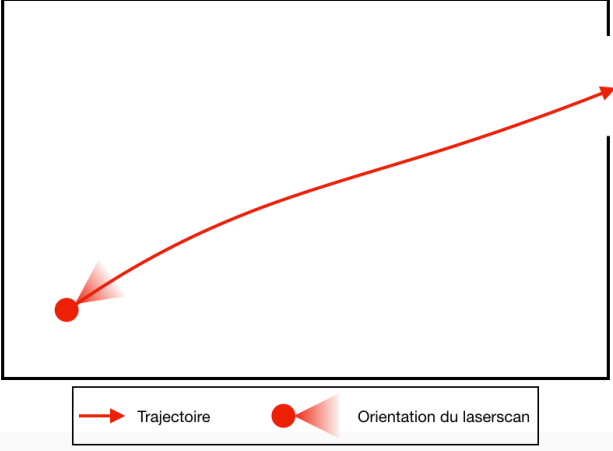
Figure 11 : Déplacement recommandé en intérieur	Figure 12 : Passage des escaliers
<p style="text-align: center;">Relevé d'une salle de classe</p>  <p style="text-align: center;"> → Trajectoire ● Orientation du laserscan </p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Ascension d'un escalier</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>Descente d'un escalier</p>  </div> </div> <p style="text-align: center;"> → Trajectoire ● Orientation du laserscan </p>
<p>L'important dans un scan en intérieur c'est de garder un champ de vision maximal afin de récupérer le plus de données possible. De plus, un grand champ de vision permet aussi au SLAM de plus facilement se repérer et donc de réduire le risque d'erreurs. L'idéal est de longer les murs afin de garantir le maintien du plus grand champ de vision possible.</p> <p>Il faut, cependant, prendre en compte que la portée du BLK2GO n'excède pas les 25 mètres. La technique s'applique donc essentiellement aux relevés en intérieur de petite à moyenne taille. Cette technique ne serait, par exemple, pas très efficace dans un grand entrepôt vide.</p>	<p>Le passage d'escaliers est une étape compliquée lors d'un relevé avec un laserscan. Les géométries ascendantes et descentes d'un escalier réduisant en général fortement le champ de vision à distance. Il est donc très important de garder un recouvrement suffisant du début à la fin. Pour cela, et sachant que les dessous d'escaliers sont généralement de simples surfaces uniformes qui ne sont pas idéales pour le suivi de la trajectoire par SLAM, le tracé pour monter et descendre doit rester sensiblement le même.</p> <p>Pour monter, il faut tenir l'appareil devant soit de sorte à maintenir un champ de vision suffisant.</p> <p>Pour descendre, ce même cheminement est réalisé, mais en marchant en arrière.</p>

Figure 13 : Passage des portes	Figure 14 : Début d'un scan
<p style="text-align: center;">Passage d'une porte</p>  <p style="text-align: center;"> → Trajectoire ● Orientation du laserscan </p>	<p style="text-align: center;">Lancement d'un scan</p>  <p style="text-align: center;"> → Trajectoire ● Orientation du laserscan </p>
<p>Le passage des portes est une étape délicate dans un scan. Le but est de conserver un nombre de points suffisant entre les deux côtés de la porte. Pour ce faire, il est conseillé de s'approcher lentement sur un des bords de la porte et de passer la porte latéralement afin que l'appareil puisse simultanément voir les deux pièces. Au moment de passer la porte, il est recommandé de faire une pause de quelques secondes afin de numériser suffisamment de points entre les deux pièces et de permettre au SLAM de se repérer facilement.</p>	<p>Pour démarrer un scan, il est conseillé de se placer dans une des extrémités du scan à réaliser avec un grand champ de vision. Ensuite, il faut lancer le scan et la machine commence par se calibrer à l'aide d'un système rotatif intégré dans la machine. Pendant cette étape, il est important que le laserscan ne bouge pas, l'opérateur peut donc le maintenir enfoncé sur son embase avec une légère pression. Lorsque l'anneau lumineux passe au vert, l'appareil commence à prendre des mesures et l'opérateur peut entamer la numérisation. Pour numériser les géométries situées derrière l'opérateur au début du scan, il est possible de soit réaliser un tracé permettant un champ de vision sur ces géométries, soit de tenir le laserscan en hauteur, afin que ce dernier puisse numériser l'environnement derrière l'opérateur.</p>
Auteur : Mossay, 2022	Source : Van Genechten, 2022

L'idée de base de toutes ces techniques de bon maniement du laserscan portable repose sur le maintien en permanence du plus grand champ de vision possible. Les géométries relevées à distance auront une densité de points moins importante mais il sera plus facile pour le SLAM de se repérer et de se recalibrer au tracé effectué par l'opérateur. En ce qui concerne la densité de points, il est possible de ralentir le déplacement de l'utilisateur, ce qui augmente le temps de mesure d'un même endroit et densifie le nuage de points.

4.3 Matériel utilisé


4.3.1 Appareils de mesures

4.3.1.1 Station totale Trimble S8

Il s'agit d'une station totale robotisée avec une précision angulaire de 1'' (0,3 mgon) selon la norme DIN¹ 18723 et une précision sur les mesures de distance de 1mm + 2 ppm selon l'ISO² 17123-4. Cette station totale compense automatiquement un grand nombre d'erreurs, tels que les erreurs de colimations, ce qui facilite la tâche de l'utilisateur et limite le risque de présence d'erreurs grossières (Trimble, 2007-2013).

4.3.1.2 Leica RTC 360 (TLS)

Tableau 5 : Fiche technique RTC 360

Figure 15 : RTC 360	
	
Champ de vision	360° (horizontal) / 300° (vertical)
Portée	de 0,5 à 130 mètres
Vitesse d'acquisition	jusqu'à moins de 2 minutes
Résolution	3 paramètres (3/6/12 millimètres à 10 mètres)
Précision angulaire	18''
Précision sur les mesures de distance	1 millimètre + 10 ppm

¹ Deutsches Institut für Normung

² International Organisation for Standardisation


^{1&2} Ces normes donnent des précisions attendues statistiquement dans certaines conditions. Il ne s'agit pas de la précision effective d'une simple mesure. Ces normes sont réalisées en supposant un double-retournement qui permet déjà de s'affranchir de nombreuses erreurs systématiques liées à l'appareil (Professional Surveyor Magazine, 2002 & Billen, 2021).

Précision 3D d'un point	1,9 mm à 10 m 2,9 mm à 20 m 5,3 mm à 40 m
Prix de l'instrument	àpd 60000 €
Prix du logiciel (Cyclone Register 360)	2278 € HTVA (pour une licence permanente)

L'instrument Leica RTC 360 est un scanner laser sur trépied du type TLS. Il est muni de quatre caméras, une sur chaque coin, qui lui permettent de se repérer en temps réel à l'aide d'un système inertiel visuel (VIS). Ce système fonctionne selon le même principe que le SLAM, mais dans ce cas il sert à l'appareil à se repérer grossièrement et à fusionner deux nuages de points successifs par "Cloud to Cloud". Grâce à ce système VIS, cet appareil n'a pas besoin de cibles pour fusionner deux nuages de points. Ce laserscan possède donc déjà de nombreuses caractéristiques qui lui permettent de réaliser des mesures relativement rapides (Leica Geosystems AG, 2018).

4.3.1.3 Leica BLK2GO (MLS)

Tableau 6 : Fiche technique BLK2GO

<i>Figure 16 : BLK2GO</i>	
	
Champ de vision	360° (horizontal) / 270° (vertical)
Portée	de 0,5 à 25 mètres
Vitesse d'acquisition	en continu
Résolution	ND
Précision angulaire	ND
Précision sur les mesures de distance	ND
Précision 3D d'un point	Précision relative = 6 à 15 millimètres Précision absolue = 20 millimètres
Prix de l'instrument	àpd 39000 €
Prix du logiciel (Cyclone Register 360)	2278 € HTVA (pour une licence permanente)

Le Leica BL2GO est un laserscan de type MLS et plus précisément de type “handheld“, c’est-à-dire qu’il s’agit d’un appareil tenu dans la main lors de la prise de mesure. Son fonctionnement est assez simple, il suffit de se déplacer à travers un environnement pour relever ce dernier. Le suivi de la trajectoire se fait à l’aide d’un système SLAM, qui ne permet pas de reconnaître des boucles (Van Genechten, 2022 ; Leica Geosystems AG, 2018).

4.3.2 Autre petit matériel

- 12 cibles sphériques magnétiques
- 12 cibles magnétiques à damier
- 1 trépied pour la station totale
- 1 trépied pour les laserscan RTC 360 (TLS)
- Cibles autocollantes
- 1 support pour placer le trépied en intérieur
- 1 miniprisme
- 1 trépied pour tenir le Miniprisme
- 2 clous d’arpentage

4.3.3 Logiciels

Pour l’ensemble des opérations de ce travail, quatre logiciels ont été utilisés à différentes étapes et pour réaliser les différents traitements.

4.3.3.1 Octave™

Octave™ est un logiciel de calcul gratuit reprenant en majeure partie le langage de codage du logiciel similaire mais payant, Matlab™. Ce logiciel permet de coder des équations et permet d’automatiser des opérations. Dans le cadre de ce travail, ce logiciel est utilisé pour calculer les moindres carrés afin de réaliser le cheminement de la station totale selon la méthode apprise au cours de “Compléments de topographie“ (Billen, 2022).

4.3.3.2 Cyclone Register 360™

Il s’agit pour ce logiciel de l’interface officielle pour les traitements des nuages de points de la société Leica. Etant donné que les deux laserscans utilisés lors de ce travail proviennent de la même marque

(Leica RTC 360 & Leica BLK2GO), cette interface est utilisable pour les nuages des deux machines. L'avantage que les deux nuages de points soient traités par le même logiciel, réside dans le fait que les comparaisons portent réellement sur les nuages de points et non sur d'éventuelles différences de traitements dans deux logiciels différents.

Ce logiciel payant permet d'importer les données directement depuis les machines et d'effectuer une multitude d'opérations telles que le nettoyage des nuages de points, la détection des cibles, la fusion de plusieurs nuages, l'attribution de coordonnées et la réalisation de mesures de distances simples (Van Genechten, 2022).

4.3.3.3 CloudCompare™

CloudCompare™ est un logiciel spécialisé pour le maniement et le traitement de nuages de points. Il permet de comparer des nuages entre eux, mais aussi des nuages avec des surfaces. Une multitude de fonctions et d'algorithmes dédiés aux traitements des nuages est directement intégré au logiciel. Il est aussi possible de créer des meshes ou de calculer des surfaces à partir d'un ensemble de points (Poux, 2022).

Dans le cadre de ce travail, CloudCompare™ est essentiellement utilisé pour la réalisation des comparaisons cloud to mesh par rapport aux surfaces calculées par le même logiciel. Le logiciel permet également d'exporter ces résultats sous différentes formes, soit sous forme graphique d'un histogramme, qui permet une analyse visuelle, soit sous forme de tableaux ".csv" qui peuvent être utilisés à l'aide d'un logiciel tableur tel qu'Excel™. En plus de récupérer des résultats, CloudCompare™ permet de réaliser une première analyse statistique des résultats par un test de Gauss ou de Weibull, qui peuvent être exportés de la même manière que les autres résultats présentés ci-avant.

4.3.3.4 Excel™

Le tableur Excel™ est utilisé à différents moments de ce travail. D'une part, il est utilisé lors du cheminement de la station totale pour réaliser les premiers traitements sur les données brutes, afin de ne sortir que des moyennes qui peuvent être utilisées pour le traitement des moindres carrés dans le logiciel Octave™. D'autre part, les résultats obtenus par les différentes méthodes de comparaisons utilisées, sont traités dans le tableur dans le but d'y effectuer les analyses statistiques.

4.4 Prises de mesures

4.4.1 Contraintes physiques et horaires

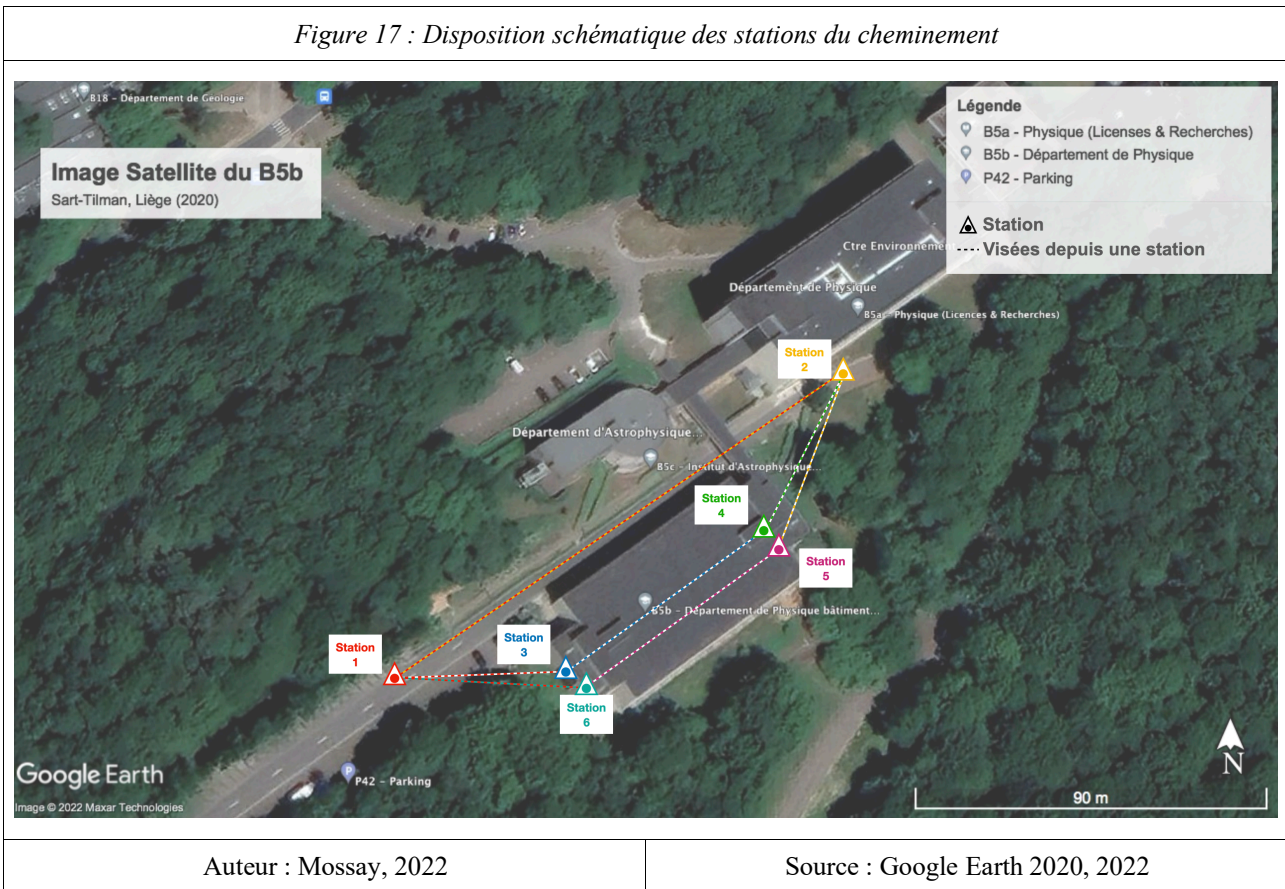
Le lieu des relevés a été sélectionné pour les différentes raisons énoncées dans la section “Site d’analyse“. Néanmoins, avec ce choix de lieu, une contrainte physique s’est ajoutée, vu qu’il s’agit d’un bâtiment d’un département de l’Université de Liège différent de celui de l’unité de Géomatique, une autorisation spéciale a dû être demandée auprès du responsable du département de sciences physiques, Monsieur N. Vandewalle. L’autorisation d’accès au bâtiment a été délivrée le samedi 2 avril.

Dans le cadre de ce travail, la société Leica a fourni le MLS BLK2G0 sous forme d’un prêt pour un weekend uniquement. L’ensemble des prises de mesures ont été réalisées le week-end du 2 et 3 avril, qui coïncide avec le début des vacances de Pâques avec comme conséquence que le bâtiment n’était pas trop fréquenté. La prise de mesure un week-end est donc synonyme de contraintes et d’avantages. En effet, la faible fréquentation de l’Université le samedi 2 avril a considérablement facilité le travail en permettant de ne pas devoir surveiller sans arrêt que le champ de vision ne soit obstrué par des passants et en réduisant le risque que des objets ne bougent entre les différentes prises de mesures si elles étaient plus étalées dans le temps. De plus, les cibles ne doivent pas bouger entre les mesures de la station totale, du TLS et du MLS, ainsi, le fait de réaliser toutes les mesures le même jour a permis cette immobilité.

La réalisation de l’ensemble des mesures sur une seule journée constituait un défi au vu du peu de temps disponible. Il faut ajouter également une contrainte importante car seuls deux opérateurs étaient présents pour réaliser l’entièreté des mesures en un jour.

4.4.2 Cheminement à la station totale (Trimble S8)

Figure 17 : Disposition schématique des stations du cheminement



Le cheminement réalisé est un cheminement fermé en boucle en stationnant une seule fois sur chaque point. Le but de cette opération est de mesurer les coordonnées des cibles dans un système local, afin de pouvoir faire des contrôles de point to point sur les nuages de points. L'avantage du cheminement fermé en boucle est qu'il permet de contrôler la fermeture et d'évaluer le cheminement, ainsi que de la compenser (Billen, 2019). Pour satisfaire les bonnes pratiques du géomètre-expert, des bras de visée les plus longs possible ont été choisis pour réaliser le cheminement fermé en boucle. Pour ce faire, il a été décidé de passer par l'extérieur du bâtiment. Grâce aux baies vitrées ouvrables aux deux extrémités des couloirs, il est possible de réaliser des visées vers l'extérieur de part et d'autre du bâtiment. Ces points à l'extérieur ont été placés de la sorte à être visibles entre eux. De plus, une station a été placée près de chaque fenêtre aux extrémités des couloirs pour les deux étages. Le cheminement compte donc un total de six stations. La première station a été positionnée sur le point à l'extérieur au sud-ouest du B5b, sur le parking, et l'orientation s'est effectuée sur le deuxième point extérieur au nord-ouest du B5b. De telle manière, l'ouverture a été réalisée sur la plus grande distance du cheminement à approximativement 150 mètres.

Tableau 7 : Description du cheminement

Station	Localisation	Orientation depuis	Visées
St.1	A l'extérieur, sur le Parking au sud-ouest du B5b	St.2 (orientation du cheminement)	St.2
			St.3
			St.4
St.3	A l'intérieur, près de la fenêtre, à l'extrémité sud-ouest du couloir de l'étage 0	St.1	St.4
			Cibles
St.4	A l'intérieur, près de la fenêtre, à l'extrémité nord-est du couloir de l'étage 0	St.3	St.2
St.2	A l'extérieur, près du B5a au nord-est du B5b	St.4	St.1
			St.5
St.5	A l'intérieur, près de la fenêtre, à l'extrémité nord-est du couloir de l'étage 1	St.2	St.6
			Cibles
St.6	A l'intérieur, près de la fenêtre, à l'extrémité sud-ouest du couloir de l'étage 1	St.5	St.1
			Cibles

Toutes les mesures ont été exécutées avec un double retournement et un tour d'horizon pour chaque station dans le but de contrôler et de compenser les différentes erreurs. L'appareil corrige donc automatiquement les erreurs systématiques causées par l'instrument, comme les erreurs d'inclinaison de l'axe de tourbillonnement et les erreurs de collimation horizontale et verticale. D'autres facteurs d'erreurs tels que les conditions atmosphériques sont également prises en compte par l'appareil. Des facteurs d'erreurs, comme la courbure de la terre, n'ont pas été pris en considération car cette erreur est considérée négligeable pour un relevé d'une telle ampleur.

4.4.3 Relevés TLS (Leica RTC 360)

Pour les relevés aux laserscans TLS, les couloirs du rez-de-chaussée et du premier étage avec la plupart des laboratoires ont été numérisés.

Les relevés TLS ont été réalisés à l'aide du Leica RTC 360 en deux étapes. Les deux étages à numériser ont été relevés séparément en veillant à avoir suffisamment de recouvrement entre les deux. Au total, le scan des deux étages et des laboratoires a nécessité un total de 125 minutes de relevé pour 94 stations. Dans le but de comparer les résultats du TLS avec ceux du MLS, qui est réputé plus rapide, la vitesse de rotation la plus rapide a été sélectionnée afin de réduire au maximum le temps des relevés et de pouvoir comparer au mieux les résultats des deux appareils. Le temps de rotation

choisi est de 51 secondes pour réaliser un scan complet de 360° horizontalement, en noir et blanc et avec une résolution moyenne. Cette configuration permet donc de réduire le temps de mesure, tout en gardant une résolution suffisante pour ce type de projet de 12 millimètres à 10 mètres. La précision d'un point numérisé reste la même pour chaque vitesse de rotation et vaut 1,9 millimètres à 10 mètres, comme décrit dans le Tableau 5.

Tout d'abord, un premier scan est effectué à l'une des extrémités du couloir en ayant au préalable mis à niveau l'appareil. Ensuite l'appareil est déplacé tout en gardant une superposition suffisante avec le scan précédent afin de permettre une reconstruction entre les deux nuages de points successifs par "cloud to cloud". Dans ce cas, les cibles installées servent plutôt à réaliser des comparaisons par la suite bien qu'elles soient visibles depuis une station. L'appareil s'en sert en complément du "cloud to cloud" pour s'aligner avec les autres nuages de points. Par le fait d'être en intérieur dans un bâtiment "moderne" qui possède en principe un sol horizontal et de pouvoir utiliser un laserscan muni de compensateurs, il n'est donc pas nécessaire de niveler l'appareil à chaque station, ce qui permet d'avancer plus vite.

L'avancement de la prise de mesure se fait suivant le même procédé jusqu'à l'autre extrémité du couloir en plaçant également des stations dans les deux escaliers, afin de garantir des superpositions suffisantes entre les deux étages.

La même opération est répétée pour réaliser les scans du premier étage du bâtiment et de ses laboratoires adjacents.

Différents outils d'aide à l'utilisation de l'appareil ont permis de réaliser ces relevés dans des conditions plus que satisfaisantes :

- **Les cinq caméras**, localisées à chaque coin de l'appareil, permettent à la machine de se repérer grâce à un système fonctionnant selon un principe similaire au SLAM. Cette méthode permet à l'appareil de connaître sa position relative en permanence, ce qui facilite la reconstruction par "cloud to cloud".
- **L'application pour smartphones** permet de suivre le relevé en direct sur l'écran, en affichant un nuage de points fortement réduit, ce qui permet de voir grossièrement ce qui a été numérisé par la machine directement. Cette application permet à l'opérateur de facilement contrôler ce qui a déjà été numérisé et de mieux organiser la suite des opérations. De plus, cette application présente un plan en deux dimensions avec ce qui a été relevé et les positions relatives des stations précédentes.

Ceci permet à l'utilisateur d'indiquer au laserscan les stations précédentes qui sont visibles depuis la nouvelle station. Ces indications aident le système de l'appareil dans la reconstruction du nuage de points final. Un autre avantage est qu'il n'est pas forcément nécessaire de suivre un tracé précis. À l'aide de l'application et du fonctionnement de l'appareil, il est aisé d'effectuer des mesures hors du tracé du cheminement et ensuite de reprendre le cheminement à partir d'anciennes stations. Finalement, il est donc possible d'avoir un maillage complexe de stations avec des liens entre elles.

4.4.4 Relevés MLS (Leica BLK2GO)

Dans le cadre de ce relevé, le laserscan de type MLS est le Leica BLK2GO, qui est un laserscan portable, dit "handheld", c'est-à-dire un appareil portable à tenir dans la main. Dans ce cas, il suffit de lancer le scan et de se déplacer à travers l'endroit à numériser. L'utilisation de cet appareil est donc très simple mais son maniement lors de la prise de mesure est légèrement plus complexe et nécessite un peu de compréhension de la machine. Étant donné que les points sont mesurés en permanence et pas par station, comme pour le TLS, le suivi de la trajectoire du chemin parcouru doit être bien connu. Dans le cas du BLK2GO, il s'agit d'un SLAM qui mesure tous les points de la même manière en se rattachant directement aux mesures précédentes. Une fois les points enregistrés, ils sont fixés et ne peuvent plus être déplacés. Cette fonctionnalité empêche, en théorie, à l'utilisateur de réaliser des boucles car en repassant par un même endroit, le logiciel ne le reconnaît pas comme un lieu connu et en cas de décalage lors du cheminement, l'appareil créera deux géométries différentes.

Étant donné que les points se rattachent directement aux points précédemment mesurés, il faut faire attention en permanence à garder un nombre de points visibles suffisamment important. Si, lors d'un déplacement trop rapide ou brusque de l'appareil, celui-ci crée un décalage dans le nuage de points, cette erreur va se propager sur tous les points mesurés postérieurement. Il est donc primordial de prévoir une bonne trajectoire avant de lancer le scan. De plus, certaines particularités pour des scans en intérieur nécessitent une bonne pratique de l'utilisateur. Par exemple, les passages des portes et les changements de niveaux par des escaliers sont des zones critiques pour cet appareil. De plus, il faut prendre en considération que l'appareil a un champ de vision de 360° horizontalement mais que s'il est tenu dans la main, la machine prendrait des mesures de l'utilisateur en continu. Pour éviter cela, l'appareil fonctionne de manière "intelligente" et dans un certain angle à l'arrière du scanner, il ne mesure pas l'objet situé à moins d'un mètre. Cependant, cela implique que si l'opérateur tient l'appareil devant lui une partie de l'horizon n'est pas visible pour la machine, ce qui réduit le nombre de points mesurés et peut affecter le bon fonctionnement du SLAM. Une solution à ce problème est donc de tenir le BLK2GO au-dessus de la tête pour que celui-ci ait un champ de vision maximal.

Néanmoins, cette solution présente plusieurs désagréments. Premièrement il est plus difficile pour l'utilisateur de manier le scanner sans mouvements brusques. Deuxièmement, même si le BLK2GO ne pèse que 775 grammes (batterie comprise), il peut rapidement devenir difficile de le maintenir le plus stable possible le bras levé et tendu.

Concernant le système SLAM pour le BLK2GO, il est capable de fonctionner soit par photogrammétrie soit à l'aide des capteurs lasers en fonction de l'environnement et de l'éclairage. Lors du début du scan, l'appareil choisit automatiquement le système à utiliser.

Pour les relevés du bâtiment de physique au B5b, une multitude d'essais ont été réalisés afin de les comparer ultérieurement sur plusieurs critères visuels et géométriques. En général, le début de la prise de mesure se déroule dans un des couloirs avec une vue d'ensemble du couloir. Ensuite, le scan est lancé et la machine s'initialise afin de s'orienter dans l'espace et de déterminer ses axes en trois dimensions. Pendant cette opération, il est conseillé de tenir fermement l'appareil contre son embase pour l'empêcher de bouger et ne pas compromettre le bon fonctionnement. Dès que le cercle lumineux autour du BLK2GO passe au vert, le scan commence et l'utilisateur peut commencer à se déplacer. De nombreux scans ont été réalisés avec des vitesses de déplacement et des managements différents de l'appareil pour analyser leurs impacts sur le résultat final. De plus, de nombreuses variations de parcours ont été réalisées entre les scans. En effet, des scans pièce par pièce, des combinaisons de tests et des tours complets ont été réalisés pour vérifier la présence d'éventuels décalages entre les nuages de points finaux.

Pour ce laserscan, il est également possible d'utiliser un smartphone, ce qui permet de gérer plus facilement le travail de l'opérateur. Pendant l'avancé, l'interface montre un nuage de points réduit du relevé ainsi que le tracé suivi par l'utilisateur. Cet outil permet de contrôler l'allure du tracé et de vérifier que l'ensemble des zones à numériser soit couvert. Il permet également de visualiser la variation de la densité du nuage de points en fonction de la vitesse d'avancement. Cependant, il est difficile de réellement estimer cette densité et la qualité du nuage de points en direct mais il sera possible de les déterminer à posteriori lors des traitements.

Tout au long du trajet des photos sont réalisées à intervalle régulier par un capteur de moindre qualité dans le but de texturer le nuage de points final. Il est également possible de prendre des photos manuellement, par exemple, pour sauvegarder une image d'un point d'intérêt ou d'une zone qui semble sensible à numériser pour l'appareil. Cette photo est alors visible par l'utilisateur mais n'impacte en rien le résultat final du nuage de points. Les capteurs photographiques du BLK2GO ne

sont pas de très bonne qualité car ils servent uniquement à la localisation pour le système SLAM et à la texturation des nuages de points.

L'exportation des données de l'appareil a nécessité une vingtaine d'heures, ainsi, la réalisation d'autres prises de mesures après une première brève analyse des données était exclue. Toutes les mesures ont donc été réalisées sur la journée du samedi 2 avril et les résultats ainsi que l'intérêt des différents essais ne sont que déterminés postérieurement lors des traitements.

Tableau 8 : Ensemble des scans réalisés

Nom du scan	Nombre de points	Temps de mesure (min)	Longueur de la trajectoire (m)	Vitesse (m/s)	Description
TLS (RTC 360)					
RTC_B5b_etalage0	238 291 558	125	nd.	nd.	Couloir étage 0 + pièces
RTC_B5b_etalage1	642 863 483				Couloir étage 1
MLS (BLK2GO)					
G1	23 749 920	4,0	114,244	0,48	Couloir étage 0 (passage rapide)
G2	59 251 724	8,9	152,858	0,29	Couloir étage 0 (passage lent)
G3	72 935 131	11,6	229,913	0,33	Couloir étage 0 + boucle extérieure
G5	112 679 884	15,4	332,299	0,36	Couloir étage -1 et +1
G6	104 271 565	15,2	329,180	0,36	Boucle couloir étage 0 et 1
G7	53 632 897	8,0	275,295	0,57	même que G6 mais plus rapide
G9	24 596 256	3,7	54,485	0,24	Escalier côté sud-ouest (parkings)
G10	32 184 789	4,3	65,926	0,26	Escalier côté nord-est (B5a)
G11	47 094 245	7,1	119,782	0,28	Couloir étage 1
G12	112 491 452	18,5	398,377	0,36	Tour complet étage 1 et 4 du B5a
G14	28 131 685	4,5	85,835	0,32	Pièces étage 1 : boucle A
G15	26 130 744	4,4	78,582	0,30	Pièces étage 1 : boucle B
G16	37 059 722	5,7	118,274	0,35	Pièces étage 1 : boucle C
G17	27 281 802	4,3	79,406	0,31	Pièces étage 1 : boucle D
G18	119 690 953	18,1	417,499	0,38	Etage 1 : D -> C -> A -> B
G19	190 909 577	27,3	601,911	0,37	Tour complet (couloirs + pièces)
G20	113 182 445	17,1	407,916	0,40	Etage 1 : parcours libre

4.5 Pré-traitements

4.5.1 Cheminement et détermination des coordonnées

Les données exportées par la machine fournissent plusieurs choses. D'une part, la machine fournit les angles horizontaux et les distances obliques pour chaque mesure réalisée, et, d'autre part, les coordonnées calculées et compensées pour chaque point mesuré (Annexe 2).

Dans le but de contrôler la méthode utilisée par la station totale et de pouvoir mieux comprendre le résultat fourni par l'appareil, un deuxième cheminement a été réalisé manuellement par la méthode des moindres carrés. Comme un double-retournement a été effectué pour chaque mesure et qu'un tour d'horizon a été réalisé pour chaque station, il a d'abord fallu calculer les moyennes pour chaque mesure. Ensuite, via le logiciel de programmation Octave, les coordonnées de chaque station sont calculées et compensées par moindres carrés, à l'aide des compétences acquises aux cours de "Théorie des erreurs" (Warnant, 2020) et "Compléments de Topographie" (Billen, 2022).

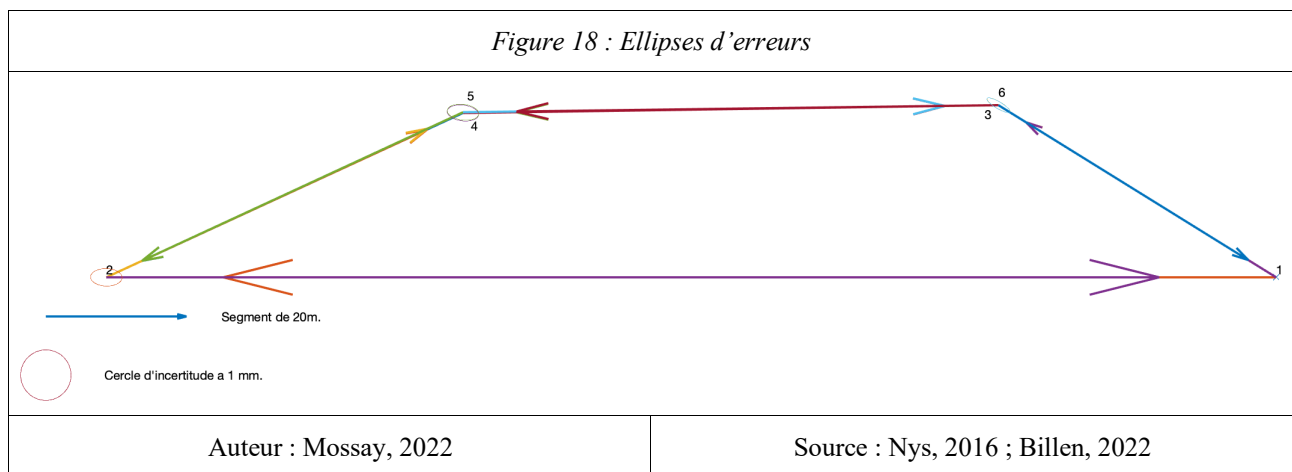
Tout d'abord, les gisements et les distances horizontales sont calculées pour chaque mesure sur la base des angles horizontaux moyens, des angles verticaux moyens et des distances obliques. Ensuite, le modèle des équations d'observation est appliqué :

Modèle des équations d'observation (modèle linéarisé)				
$\mathbf{Ax} - \mathbf{v} + \mathbf{W} = \mathbf{0}$				
Avec	A = matrice des équations	x = les paramètres estimés	v = les résidus estimés	W = vecteur des termes constants
Source : (Billen, 2022)				

Sur la base de cette formule et à l'aide d'une matrice de poids, des facteurs correcteurs et des écarts-types sont calculés pour chaque coordonnée. Cependant, le calcul des moindres carrés n'est réalisable qu'à condition que les erreurs soient de nature aléatoire et non systématiques ou grossières. Pour cette raison, une validation globale est réalisée au travers d'un test statistique de Chi². Si l'hypothèse nulle est vérifiée, les erreurs suivent une courbe normale et sont donc bien aléatoires. Pour finir, les calculs sont réitérés jusqu'à ce que les valeurs obtenues restent plus ou moins stables.

Ensuite, les coordonnées des cibles mesurées sont déterminées sur la base des gisements et des distances horizontales par rapport aux coordonnées calculées. Le code relatif à ces calculs se trouve dans le fichier annexe 2.

Pour mieux se rendre compte de la précision des mesures, des ellipses d'erreurs sont calculées également via le logiciel de programmation Octave™.



Ce schéma indique la position des différentes stations avec leurs ellipses d'erreurs associées. La forme des ellipses est allongée dans les directions des visées ce qui paraît cohérent car la précision angulaire de la station totale est meilleure que la précision des mesures de distances. Dans le réseau ainsi formé, le nombre de degrés de liberté est de 5. Sur le schéma, la taille des ellipses correspond à une probabilité de 47,17 %. Néanmoins, afin de passer à une probabilité de 95 % habituellement considérée dans les applications topométriques pour 5 degrés de liberté, il est nécessaire de multiplier les axes des ellipses par une valeur F de Fisher correspondant à une probabilité recherchée (95 %) pour un degré de liberté donné (ici, 5), à savoir 3,4018. La taille des ellipses représentées sur le schéma (Figure 18), d'une probabilité différente, n'influence pas l'analyse de l'allure des ellipses ci-avant. Les dimensions exactes des ellipses d'erreurs sont reprises dans le tableau ci-dessous (Tableau 9).

Tableau 9 : Dimensions des ellipses

Station	Grand axe (mm)	Petit axe (mm)	Surface (mm ²)	Probabilité à
2	4,286268	2,38126	32,065352	95%
3	3,129656	1,973044	19,3991744	
4	4,218232	2,177152	28,8515457	
5	4,218232	2,177152	28,8515457	
6	3,129656	1,973044	19,3991744	

La station 2 présente la plus grande ellipse d'erreurs alors qu'elle a été relevée depuis trois stations, contrairement à la plupart des autres qui ont été relevées depuis deux stations. Cette plus grande dimension pour l'ellipse dans la station 2 peut s'expliquer en partie par le fait qu'il s'agit de la première mesure du cheminement et du point sur lequel le cheminement s'est orienté. De plus, étant donné qu'il s'agit de la plus grande distance mesurée depuis la station 1 et que les erreurs sur les mesures augmentent avec la distance, il semble cohérent que cette ellipse d'erreurs soit légèrement plus grande que les autres. Néanmoins, dans l'ensemble, les différences entre le grand axe et le petit axe sont faibles et la taille des ellipses sont globalement petites.

L'avantage principal des moindres carrés est qu'ils permettent, au contraire des autres méthodes de compensation, de compenser les mesures angulaires et de distance en même temps. De plus, les moindres carrés permettent de prendre en compte plusieurs mesures d'un même point à partir de stations différentes. Par exemple, dans le cadre du relevé de ce mémoire, la station 2 a été mesurée depuis la station 1 et depuis la station 4. Ensuite, depuis la station 2, la station 1 a été mesurée à nouveau. Ce qui a créé des recouvrements dans le cheminement. De tels recouvrements ne sont pas retenus dans des compensations basiques, alors qu'avec les moindres carrés ils sont pris en compte, ce qui permet en plus d'améliorer la précision des résultats, d'augmenter le degré de liberté (Billen, 2022).

4.5.2 Nettoyage et regroupement des nuages de points (Cyclone Register 360)

La totalité des étapes du pré-traitement sur les nuages de points ont tous été réalisés sur le logiciel Leica. Ce logiciel permet entre autres d'importer les données des laserscans sur l'ordinateur et d'y effectuer une multitude de pré-traitements.

4.5.2.1 Nettoyage des nuages de points

Le nettoyage est une étape primordiale lors du traitement des nuages de points. Le laserscan mesure tout ce qui est perceptible dans son champ de vision. Dans de nombreux cas, seul un certain échantillon de ce nuage est nécessaire. Il faut donc découper toutes les parties non intéressantes selon l'application. Par exemple, certains objets en mouvement, comme la végétation, peuvent également être supprimés du nuage de points. Le principal inconvénient avec ces objets en mouvement provient du fait qu'ils peuvent poser des problèmes lors de la fusion de plusieurs nuages. Un autre exemple d'éléments qui posent des problèmes concerne une majorité des surfaces transparentes ou réfléchissantes, qui entraînent des géométries aux mauvais endroits. Dans la littérature, elles sont appelées "ghost walls". Pour limiter les problèmes provenant de ces éléments, il est donc essentiel de supprimer ces faux points.

Il s'agit d'une étape chronophage car il faut généralement parcourir manuellement le nuage de points et sélectionner les points à supprimer, sans effacer de bons points. Il existe quelques outils qui permettent de faciliter ce travail mais pour un résultat de qualité, il faut dans la majorité des cas réaliser une grosse partie du travail manuellement.

Dans le logiciel Cyclone Register 360, qui est le logiciel 3D de Leica, cette étape se fait à l'aide d'un outil de sélection qui permet plusieurs options envisageables :

- Soit il est possible d'effacer les points à l'intérieur ou à l'extérieur de cette sélection ;
- Soit il est possible de reconstruire les points à l'intérieur ou à l'extérieur de cette sélection. Cette fonction permet de facilement revenir en arrière lors d'une mauvaise manipulation ou d'une erreur.

4.5.2.2 Détection des cibles

Lors de l'importation des nuages de points du RTC 360 (TLS), il est possible de sélectionner la détection automatique des cibles. Cette option est envisageable car le RTC 360 est capable de reconnaître des cibles sphériques et des cibles à damier. Dans le cas où une cible n'est pas détectée ou que le logiciel détecte une géométrie qui n'est pas une cible, il est possible d'aller les éditer manuellement.

Le BLK2GO (MLS) n'est pas capable de reconnaître des cibles, aussi, il faut les sélectionner manuellement. La fonction, permettant de sélectionner des cibles, peut détecter des cibles sphériques ou à damier et créer également des cibles arbitraires que l'utilisateur peut placer à sa guise. En théorie, l'utilisateur sélectionne un des points faisant parti d'une cible et le logiciel calcule automatiquement le centre de celle-ci grâce à la géométrie ou la variation des couleurs dans les points avoisinants. En pratique, cette étape est plus compliquée lorsque le nuage de points n'est pas très dense. Dans ce travail, les cibles à damier posent souvent un problème car les nuages de points du BLK2GO ne sont pas suffisamment denses pour la plupart des scans réalisés et les cibles à damier n'ont donc pas pu être correctement déterminées. Plusieurs essais ont montré que dans de nombreux cas le logiciel "trouve" le centre de la cible. Néanmoins, lors de déplacements autour de cette cible, il est possible de se rendre compte que le point placé par le logiciel ne correspond pas au centre de la cible et est même dans certains cas, placé sur un des points à l'arrière-plan. Pour éviter tout risque d'imprécision, les cibles n'ont finalement pas été utilisées dans le cadre de ce mémoire. En ce qui concerne les cibles sphériques il faut parfois réitérer plusieurs fois l'opération jusqu'à ce que les algorithmes du logiciel détectent celles-ci.

À la suite des contraintes horaires, il n'a pas été possible de refaire des mesures avec d'autres vitesses d'avancement dans le but d'avoir des nuages plus denses, ni avec d'autres positions pour les cibles ni avec des cibles supplémentaires. Le nombre de cibles exploitables pour l'ensemble de la numérisation des deux étages avec des laboratoires se réduit à 12. Ce nombre semble assez faible pour un assemblage ultérieur des nuages de points, mais il devrait être suffisant pour réaliser une analyse point to point.

4.5.2.3 Regroupement de nuages en groupes

Le regroupement des nuages de points consiste à superposer deux nuages de points de manière qu'ils soient correctement alignés selon les trois dimensions. Le regroupement sur Cyclone Register 360 peut se faire de deux manières différentes :

- **Alignement visuel** : Cette méthode consiste à superposer manuellement les deux nuages de points de la manière la plus correspondante possible. Pour faciliter cela, il est possible de changer de point de vue afin de permettre un alignement selon les trois axes X, Y et Z. Lorsque les nuages de points semblent correctement superposés, la fonction d'alignement visuel joint les deux nuages en cherchant des similitudes entre les deux nuages de points et les combine en un seul en créant un lien entre eux. Ce lien peut s'afficher en différentes couleurs selon la qualité du raccordement. D'autres fonctions permettent d'optimiser cette

jonction. Il est donc très important de bien superposer les deux nuages avant de lancer la fonction d'alignement afin d'aider au mieux l'algorithme et d'alléger le traitement. Une fois tous les nuages d'un groupe rassemblés, il est possible d'optimiser le résultat du groupe et donc les liens entre les différents nuages.

- **Faire correspondre les cibles** : Cette méthode ne fonctionne seulement si un minimum de trois cibles communes est visible sur les deux nuages de points à joindre. Idéalement, il faut un maximum de points communs entre les deux nuages et une répartition la plus étalée dans l'espace afin d'éviter au maximum tout risque d'erreurs. Etant donné que les mesures ont été principalement réalisées dans de longs couloirs et que les stations totales, qui ont servi à mesurer ces cibles, ont été placées aux extrémités de ceux-ci, il était difficile de bien répartir la position des cibles. Un autre problème provient du fait que les cibles à damier utilisées lors des mesures, ne sont pas correctement détectées par le logiciel Cyclone Register 360 pour les nuages de points du BLK2GO. Dans le cadre de ces mesures, les nuages n'étaient en général pas suffisamment denses pour que le logiciel puisse les détecter. Seules, les cibles sphériques ont pu être utilisées pour ce type de reconstruction et en raison du faible nombre de sphères pour deux étages de scan, 12, cette méthode n'a pas souvent été exploitable. De plus, dans de nombreux cas, les cibles étaient trop alignées par rapport au lien à créer entre deux nuages de points et donc le logiciel n'était pas capable de créer des liens sur la base des cibles.

Ainsi, la méthode préconisée pour la plupart des nuages de points, et surtout ceux du BLK2GO, était celle de l'alignement.

Une autre fonctionnalité permet, cependant, de regrouper les cibles lorsque tous les liens ont été réalisés. Cette méthode fonctionne bien pour les nuages du RTC mais ne fonctionnent pas pour les nuages du BLK2GO car ces nuages sont indéformables, ainsi, en cas de boucle, si deux mêmes cibles sont décalées, il n'est pas possible de les faire correspondre. Donc, dans le cas de jonction entre deux nuages de points avec un des deux qui présente deux fois le même point, cette opération ne fonctionne pas. Cette méthode ne fonctionne pas non plus si un ou les deux nuages ont subi une distorsion.

Dans le cadre de ce mémoire, afin de comparer différents aspects entre les nuages de points du TLS et du MLS, une série de groupes variés avec différentes constellations a été réalisée sur la base de différents nuages de points.

Tableau 10 : Groupement des scans

TLS					
Nom du groupe	Nombre de points	Temps de mesure (min)	Nombre de scans utilisés	Constituants	Erreur du groupe (m)
RTC_tour_complet	881 155 041	125	94	RTC_B5b_etage0 + RTC_B5b_etage1	0,004
	Description :	Tour complet des deux couloirs et des laboratoires du premier étage			
MLS					
Gr.1	157 892 729	24,0	4	G2 + G9 + G10 + G11	0,012
	Description :	Tour complet des deux couloirs sans les laboratoires			
Gr.2	159 932 695	26,0	5	G11 + G14 + G15 + G16 + G17	0,010
	Description :	Couloir et laboratoires du premier étage			
Gr.3	272 750 299	42,9	8	G2 + G9 + G10 + G11 + G14 + G15 + G16 + G17	0,015
	Description :	Tour complet des deux couloirs et des laboratoires du premier étage			
Gr.4	275 372 917	42,1	5	G2 + G9 + G10 + G11 + G18	0,008
	Description :	Tour complet des deux couloirs et des laboratoires du premier étage			

L'erreur du groupe donne une idée sur la qualité du regroupement des différents nuages de points entre eux. Les rapports de traitement du logiciel Cyclone Register 360 séparent cette erreur en erreur des cibles et en erreur de nuages à nuages. Ces deux erreurs représentent respectivement l'erreur moyenne entre les cibles des différents scans regroupés et l'erreur moyenne du regroupement en cloud to cloud (nuage à nuage) (Fichier annexe 3.1). Ces rapports fournissent d'autres informations concernant les regroupements des nuages de points qui peuvent donner des indications sur la qualité de ce dernier.

Une première analyse du tableau indique une qualité supérieure des nuages de points du RTC 360 (TLS) par rapport aux nuages de points du BLK2GO (MLS). Pour le TLS, les erreurs du groupe sont de l'ordre de quelques millimètres alors qu'elles sont de l'ordre du centimètre pour le MLS. Les résultats du tableau permettent de voir directement que la qualité du regroupement des nuages de points du RTC 360 (TLS) est supérieure avec une erreur millimétrique, alors que cette même erreur

se situe aux alentours du centimètre pour les regroupements des nuages de points du BLK2GO (MLS). Cette différence peut s'expliquer par le nombre de scans fusionnés par rapport aux liens entre ceux-ci. Le nuage de référence du RTC 360 (RTC_tour_complet) est formé de 94 scans liés entre eux par 224 liens. Ceux-ci créent une sorte de maille qui consolident les scans entre eux et permet de réduire l'erreur. L'erreur moyenne de quatre millimètres pour autant de scans permet par ailleurs de démontrer la très bonne qualité du RTC 360 (TLS) et justifie entre autres le choix d'utiliser le nuage de points du RTC comme référence. Les groupes créés sur la base du BLK2GO (MLS) sont seulement liés par deux liens entre chaque scan ce qui augmente fortement la possibilité d'erreurs. Dans ce cas, les groupes ont été formés pour reconstituer des boucles à l'intérieur du bâtiment et il n'est donc pas possible d'augmenter le nombre de liens entre les scans, car chaque scan a des points communs seulement avec le scan précédent et le scan suivant. Une partie de la différence des erreurs peut donc s'expliquer de cette manière. Mais un autre facteur important est la précision générale du RTC 360 (TLS) qui est nettement meilleure que celle du BLK2GO (MLS).

4.5.2.4 Attribution des coordonnées

Dans le cadre de ce travail, les points dont les coordonnées sont connues et sont utilisées lors des traitements ultérieurs, sont les cibles sphériques car elles sont pour la plupart facilement détectables pour tous les nuages de points des deux types de laserscan. Le but de cette opération est d'attribuer les coordonnées des cibles mesurées et compensées par la station totale aux cibles détectées dans les nuages de points.

Pour commencer, il faut des points dont les coordonnées sont connues, tels que des cibles et il faut leur attribuer un identifiant. Ensuite il faut sélectionner ces mêmes points dans le nuage de points et leur attribuer l'identifiant correspondant. Lorsque tous les points dans le nuage ont été correctement identifiés, il faut importer un document texte reprenant l'identifiant et les coordonnées de chaque point (selon le schéma : ID, Y, X, Z).

Ensuite, il faut importer ce document texte et, à l'aide de la fonction "attribuer un géoréférencement", le logiciel lie automatiquement les coordonnées aux points spécifiques du nuage de points. Ensuite, un tri est effectué entre les points, pour ne garder que les points qui correspondent le mieux et qui ont des erreurs assez faibles. Cependant, il est possible pour l'opérateur de sélectionner manuellement les points qu'il souhaite utiliser lors du calcul du géoréférencement. Étant donné que le but de ce mémoire est de déterminer la qualité des nuages de points, toutes les cibles sont utilisées pour les géoréférencements afin d'obtenir des données pour chaque point en particulier.

Pour finir, Cyclone Register 360 fournit une erreur moyenne de tous les points par rapport à leur coordonnées théoriques et les erreurs de chaque point par rapport à des distances selon les trois axes X, Y et Z.

Néanmoins, il faut à nouveau prendre en compte que les nuages du BLK2GO sont fixes et ne peuvent pas être déformés. Ce facteur est à prendre en considération lors des analyses ultérieures car dans le cas d'une boucle avec une distorsion, deux cibles décalées mais avec le même identifiant, sont présentes dans le nuage de points. Pour l'opérateur, il est difficile de déterminer lequel de ces points est le "bon" et le point de géoréférencement se calcule donc sur la base de ces deux points distincts en se plaçant sur une moyenne entre les deux.

4.6 Traitements

Pour la partie des traitements des nuages de points, deux méthodes différentes sont utilisées. La première est une comparaison par points spécifiques, qui compare précisément certains points des nuages de points avec des points mesurés à la station totale. Cette méthode ne fournit des informations que pour un nombre restreint de points mais elle permet de donner des résultats très précis. La deuxième méthode est une méthode qui compare des nuages de points entiers entre eux pour se rendre compte des déformations plus localisées et permettre une meilleure visualisation de ces défauts.

4.6.1 Point to point (Cyclone Register 360)

Pour la comparaison par points spécifiques, le choix se posait entre la comparaison point to point ou "model based evaluation". Dans ce cas la méthode des point to point a été choisie car elle utilise des mesures réalisées à la station totale comme référence et elle est plus complète que la "model based evaluation", tout en réduisant le risque d'erreur de mesures imprécises. La "model based evaluation" est une méthode qui peut facilement être utilisée comme moyen de contrôle rapide lors d'une application pratique. Pour rappel, le but de ce mémoire est d'évaluer la déformation des nuages de points, ainsi, la méthode la plus adéquate est celle des point to point.

4.6.1.1 Point to point distance

Cette méthode consiste à comparer des points spécifiques relevés par station totale, par laserscans TLS et MLS. Dans ce cas, les points de référence utilisés sont ceux des cibles relevées par la station totale et compensées par moindres carrés. Ces points sont utilisés comme référence car dans toutes les techniques de mesures utilisées au cours de ce travail, les mesures réalisées avec la station totale

sont, en théorie, les plus précises et exactes. Les cibles ont été relevées à l'aide d'un prisme spécial, dont le centre correspond au centre des cibles sphériques utilisées.

Les points à comparer sont les centres des cibles des différents nuages de points. Les centres des cibles ont été définies par le logiciel Cyclone Register 360, qui détermine le centre de la sphère, qui a été fixée à l'aide d'un logiciel de reconnaissance de cette forme sphérique. Etant donné que ces sphères ont été calculées sur la base d'un ensemble de points et que dans certains cas la fonction qui sert à repérer les sphères nécessite plusieurs tentatives avant que le logiciel ne repère la forme de la cible, il est probable qu'il y ait un certain risque d'erreurs.

Deux manières de procéder peuvent être utilisées dans le cadre de ces recherches. L'une se base sur la position des cibles par rapport aux coordonnées et l'autre se base sur les distances entre chaque point connu.

4.6.1.2 Position relative aux coordonnées

Cette méthode consiste à comparer les coordonnées des cibles des nuages de points avec les coordonnées calculées à l'aide des mesures de la station totale. Pour ce faire, la fonction "appliquer un géoréférencement" est utilisée pour chaque nuage de points ou pour chaque groupe à l'aide d'un calcul de moindres carrés. De telle manière, le logiciel fournit les distances des cibles par rapport aux vraies coordonnées selon les trois axes X, Y et Z.

Cette méthode permet de se rendre compte d'une éventuelle distorsion des nuages de points. Cependant, comme déjà évoqué précédemment dans la section dédiée à l'attribution des coordonnées, il peut y avoir un problème lorsque, lors d'une boucle, deux cibles avec le même identifiant se retrouvent décalées dans le même nuage de points. Dans certains cas, il est cependant possible de déterminer par une analyse visuelle quel est le point du premier passage.

4.6.1.3 Distances entre les points connus

Cette méthode consiste à comparer les distances entre tous les points connus. De cette manière, il est possible de détecter et de chiffrer un éventuel décalage lors de la trajectoire du scan. À l'aide des coordonnées des points de référence, il est aisé de déterminer les distances de référence entre chaque point et même de séparer ces distances selon le plan horizontal (XY) et l'axe vertical (Z). Ce qui permet de mieux visualiser et de comprendre la présence d'une éventuelle déformation.

Pour ce faire, les distances entre chaque cible sont mesurées à l'aide de la fonction de mesure sur Cyclone Register 360. Normalement, cette fonction est assez imprécise car l'opérateur doit choisir

manuellement deux points entre lesquels il veut mesurer la distance. Mais pour les cibles c'est différent car le logiciel détecte automatiquement celles-ci lorsque le curseur est placé à proximité. Il est donc facile de mesurer les distances entre chaque cible. Toutes ces mesures sont, ensuite, manuellement retranscrites par l'utilisateur dans un tableur ExcelTM. Pour finir, ces distances sont comparées avec les distances de référence.

Étant donné que les résultats obtenus ont tous les deux pour but de réaliser une analyse sur les distorsions des cibles des nuages de points par rapport aux coordonnées de la station totale, seule la méthode des distances entre les points connus est utilisée lors des comparaisons statistiques. Ce choix s'est imposé car dans le cas de cibles en double dans un même scan, la méthode des positions relatives aux coordonnées réalise une moyenne entre ces deux points et répercute cette erreur sur l'ensemble des coordonnées du scan. De plus, la mesure des distances entre les points spécifiques permet de comparer chaque distance individuellement afin de donner d'éventuelles informations supplémentaires sur la géométrie. Par exemple, il est possible de détecter si les distances par rapport à un point en particulier comportent plus d'erreurs que les autres mesures. Dans ce cas, il serait possible de déduire que le problème vient probablement de ce point en particulier. Alors que l'analyse des positions relatives aux coordonnées risque de répartir de manière plus importante cette erreur à cause de la transformation du logiciel pour faire correspondre au mieux les points aux coordonnées.

4.6.2 Cloud to mesh (CloudCompareTM)

Pour la comparaison de nuages entiers, de nombreuses possibilités ont été considérées. La première et la plus simple, est la comparaison par "cloud to cloud". Mais étant donné que celle-ci est fort dépendante du bruit et du risque d'erreurs en cas de zones peu denses dans le nuage de points de référence, cette méthode n'a pas été choisie pour ce travail. Il existe certaines solutions qui permettent de réduire le bruit mais celles-ci consomment beaucoup de temps de traitements, ainsi, cette méthode entraîne la perte de l'intérêt du MLS d'être plus rapide. En effet, pour rappel, le but de ce travail est de comparer les MLS par rapport aux TLS afin de voir s'ils sont exploitables dans des cas pratiques. Mais si l'atout principal du MLS, sa rapidité de prises de mesures, est fortement réduit à cause des traitements, alors la comparaison ne serait plus aussi pertinente.

En théorie, la méthode la plus précise serait la comparaison "cloud to surface", mais sur le logiciel CloudCompareTM, utilisé pour les traitements lors de ce travail, de nombreux essais ont démontré que cette méthode est très chronophage. De plus, il est compliqué de choisir les bons paramètres pour créer suffisamment de surfaces pour éviter de récupérer un nombre d'approximations excessif mais

en ne perdant pas de vue qu'il ne faut pas en créer de trop pour que cette méthode garde un intérêt géométrique. Un autre aspect problématique est l'environnement de travail. Étant donné que les couloirs sont jonchés de placards en bois intégrés aux murs en béton, il y a forcément des légers décalages qui auraient été négligés avec la méthode des surfaces. Le dernier aspect problématique de cette méthode dans CloudCompare™ provient de la possibilité de comparer une seule surface à la fois avec un nuage de points, ce qui nécessite beaucoup de temps et de traitements et ce qui n'est pas forcément intéressant.

Le meilleur compromis entre les deux est donc la méthode cloud to mesh qui permet de garder les nuages à comparer tels quels, sans transformation, et de les comparer au nuage de référence auquel un maillage a été appliqué. Ce maillage permet théoriquement d'améliorer le résultat et de réduire les erreurs en cas de zones peu denses présentes dans le nuage de référence.

4.6.2.1 Cloud to mesh

Cette méthode consiste à mesurer les distances entre les points du nuage à comparer et un maillage créé à partir du nuage de points de référence. Dans ce cas, le nuage de points du RTC 360 (TLS) est utilisé comme référence et les nuages du BLK2GO sont les nuages à comparer.

Il s'agit d'un maillage constitué d'une multitude de petits triangles dont chaque sommet correspond à un point du nuage de référence. Il ne s'agit donc pas d'une surface uniforme mais de millions de petites surfaces triangulaires. Cette méthode présente des avantages comme des inconvénients. Un des avantages est que si, sur le terrain, une surface mesurée présente des légères variations, celles-ci sont prises en compte par le maillage. Le maillage permet donc de repérer des variations plus légères. Cependant, dans le cas contraire, si une surface, sur terrain, est réellement lisse, les points du nuage ne seront pas tous parfaitement alignés à cause de l'imprécision des mesures ou d'autres facteurs d'erreurs intervenants. Dans ce cas, le maillage va donc représenter un ensemble de surfaces qui ne sera pas parfaitement droit.

De plus, il faut faire attention avec la configuration des paramètres du maillage. En théorie, chaque point est sensé appartenir à un des triangles de la maille mais dans de nombreux cas certains points se trouvent isolés pour diverses raisons, comme un nettoyage pas suffisamment rigoureux. Dans ce cas de figure, l'algorithme utilisé pour la construction du maillage va attribuer ce point à un triangle avec les points les plus proches. Ceci engendre en général la création de surfaces bizarres qui ne correspondent pas exactement à la réalité mais s'en rapprochent fortement.

Toutes les opérations concernant cette méthode ont été réalisés sur le logiciel CloudCompare™ qui contient une fonction cloud to mesh. Cette fonction calcule les distances entre un nuage de points et un maillage, en prenant automatiquement ce dernier comme référence.

4.6.2.2 Construction du maillage (mesh)

Dans le cadre de ce travail, le maillage a été réalisé sur le nuage de points du RTC 360 (TLS) à la suite de plusieurs opérations. Pour créer un mesh sur CloudCompare™, il y a deux solutions. La première est une fonction de CloudCompare™ qui utilise une triangulation de Delaunay. La triangulation de Delauney sert à passer de points à polygones en créant une multitude de triangles avec un des points du nuage à chaque coin, selon le critère de Delaunay (Donnay, 2013). Cependant, cette méthode est très chronophage et le choix des paramètres est primordial afin d'obtenir un maillage acceptable. Pour ces raisons, la seconde méthode a été retenue. Cette dernière consiste en la réalisation d'une triangulation qui s'effectue par reconstruction de surfaces de Poisson. Cette méthode se base sur des vecteurs orientés pour déterminer et extraire les surfaces les plus appropriées (Kazhdan, 2013). Pour ce faire, il faut d'abord générer des normales dans le nuage de points de référence à l'aide de la fonction prévue à cet égard dans CloudCompare™.

Pour la création des normales, plusieurs paramètres ont dû être sélectionnés (Annexe 3). Pour l'approximation des surfaces, c'est l'option "triangulation" qui a été choisie car c'est la plus adaptée pour des environnements avec de nombreux angles et des surfaces planes, même si ce n'est pas l'option qui réagit le mieux au bruit. Etant donné que c'est le nuage de référence qui subit ce traitement et que pour ce dernier le bruit n'est pas vraiment un problème, ce paramètre convient bien à cette situation. Ensuite, il faut opter pour un "octree", qui est une subdivision de l'espace en octants. Plus celui-ci est élevé et plus la subdivision est grande et mieux est, en théorie, la qualité du résultat. Cependant, plus "l'octree" est grand et plus le traitement est lourd. C'est pour cette raison que la fonction du choix automatique de l'octree, présent dans CloudCompare™, a été choisie. De telle manière, le logiciel sélectionne un octree adapté au nuage de points. Le dernier paramètre à arrêter est celui du "spanning tree", qui détermine le nombre de points voisins qui peuvent être liés à chaque point. Plus ce chiffre est élevé et plus le résultat final est précis mais plus le traitement est long et plus les résultats deviennent lourds à manipuler. Dans ce cas, l'opération de la création de normales a déjà nécessité plus d'une heure de traitements et donc ce paramètre n'a pas été changé pour éviter d'alourdir les traitements (CloudCompare™).

Ensuite, le plugin "Poisson Surface Reconstruction" peut être effectué (Annexe 4). Dans ce cas "l'octree" doit être déterminé manuellement. Pour ce faire, plusieurs essais ont été réalisés en

augmentant de petit à petit la valeur de “l’octree“ jusqu’à arriver à un traitement de plus d’une heure mais fournissant des résultats satisfaisants. La fonction “output density as SF“ a été cochée car elle classe le maillage selon sa proximité avec le nuage de points d’origine. Ainsi, l’utilisateur peut affiner légèrement le maillage par la suite. Dans les paramètres avancés, il est possible de choisir entre plusieurs options de “boundary“. À la suite de plusieurs essais et après le nettoyage des points les plus éloignés, c’est la méthode de “Dirichlet“ qui présente le meilleur résultat visuel et c’est donc ses paramètres qui ont été sélectionnés (CloudCompare™).

4.6.2.3 Alignement des nuages avec le mesh

L’alignement des nuages de points avec le maillage a posé une série de problèmes. Dans un premier temps, un alignement manuel et, ensuite, un alignement précis de nuage à nuage ont été choisis. Cependant, cette méthode déplace le nuage de points afin que l’ensemble des distances des plus proches voisins soit la plus petite possible. De telle manière, les éventuelles erreurs sont réparties sur l’ensemble du scan et il devient difficile de différencier les déformations, le bruit ou les éventuels mauvais nettoyages des nuages de points.

La deuxième méthode consistait en l’alignement des nuages avec le maillage par la pièce du début des scans dans le but de mettre en évidence la distorsion et la propagation d’erreurs. Néanmoins, l’analyse des résultats a indiqué de fortes distorsions mais non-cohérentes avec la trajectoire suivie lors des scans et avec les observations réalisées lors des pré-traitements. Une forte distorsion se forme à l’autre extrémité du couloir sur les deux niveaux, mais cette distorsion diminue fortement à la fin de boucle, alors qu’un décalage important y a été observé lors des pré-traitements avec plusieurs géométries qui s’affichaient en double. Une raison logique de ce constat peut être que l’alignement par cloud to cloud du maillage et du nuage de points a engendré une petite erreur, qui s’est fortement propagée avec la distance à l’autre extrémité du couloir, distant d’environ septante mètres.

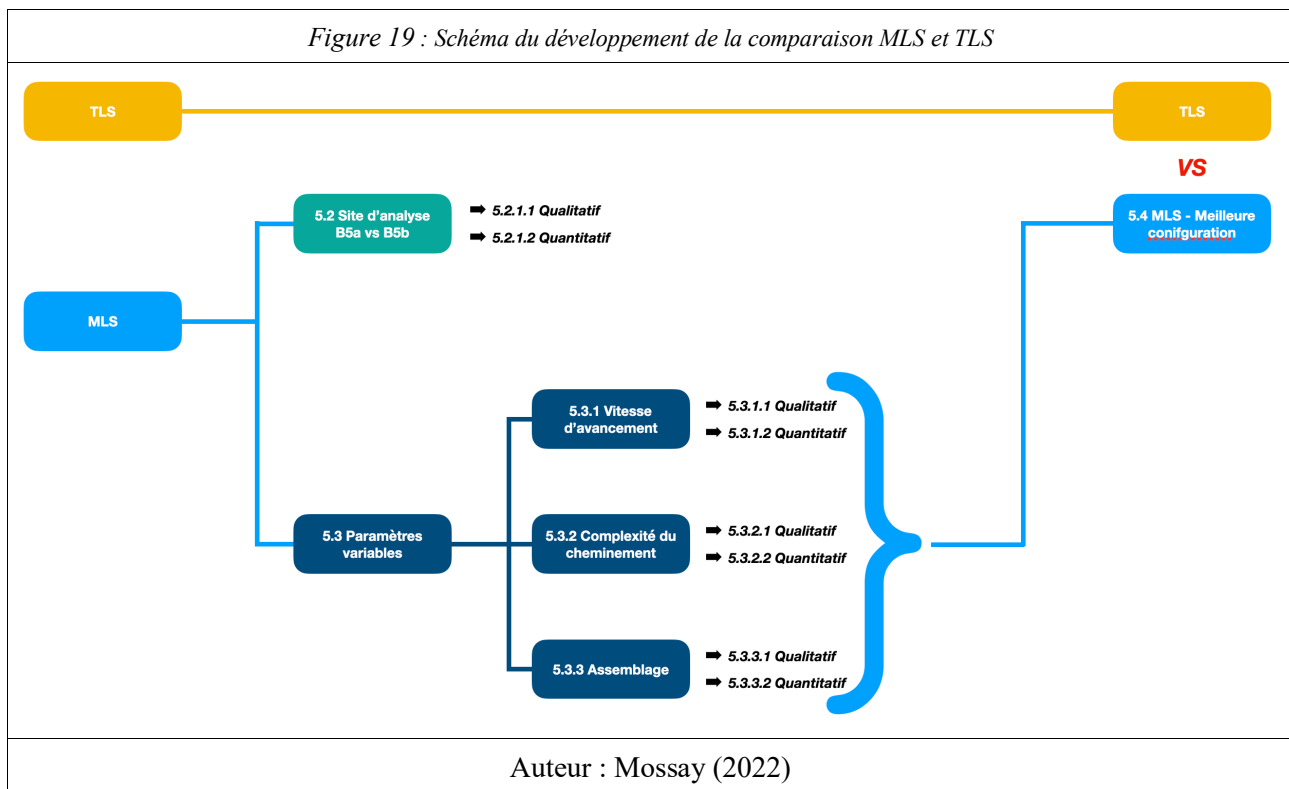
Finalement, une troisième méthode a été utilisée pour aligner le maillage et les nuages de points à comparer. Sur le logiciel Cyclone Register 360, la géoréférenciation a été appliquée sur l’ensemble des cibles et exportée avec les coordonnées du système local. Dans le cas où plusieurs cibles identiques étaient visibles, celles du premier passage ont été choisies par une analyse visuelle. Ensuite, les nuages de points géoréférencés ont été importés dans CloudCompare™ en spécifiant au logiciel de ne pas décaler le nuage de points, comme il le fait en général pour le placer de manière “optimale“. De telle manière, tous les nuages se superposent automatiquement par leur coordonnées et la fonction cloud to mesh peut être lancée.

4.6.2.4 Cloud to mesh

La dernière étape est le calcul des distances entre les points du nuage à comparer avec le maillage du nuage de référence. Pour cela, il existe la fonction cloud to mesh sur CloudCompareTM. Celle-ci choisit automatiquement le maillage comme référence et aucun paramètre ne doit être sélectionné. Après un long temps de chargement, chaque point du nuage est colorié en fonction de son éloignement avec le maillage. Il est également possible de récupérer des histogrammes reprenant la distance moyenne et l'écart-type pour chaque nuage de points. Ces résultats sont ceux utilisés pour l'analyse statistique de la partie des cloud to mesh.

Chapitre 5. Analyses de la 1^{ère} campagne de mesure

Dans cette section, les différents résultats du MLS sont comparés à ceux du TLS dans le but de déterminer si la précision obtenue par le MLS s'approche de celle du TLS. Pour ce faire, il est nécessaire de déterminer une technique qui permet d'obtenir le meilleur résultat final pour le MLS.



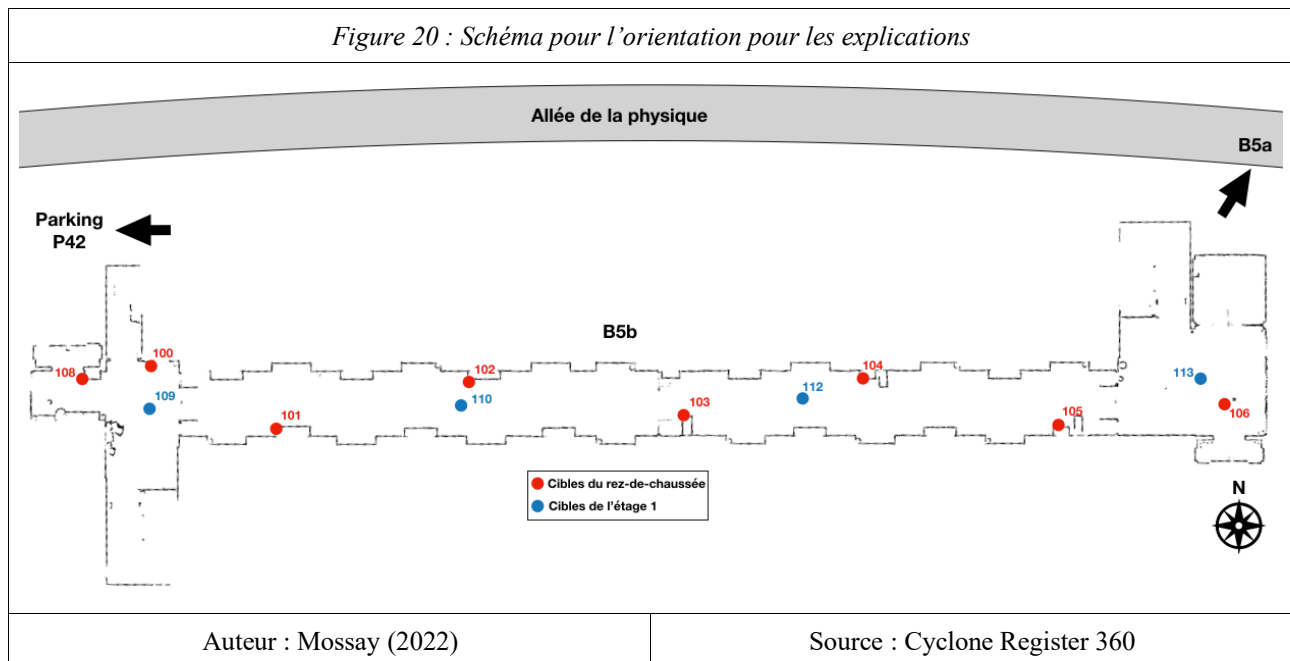
Ce schéma (Figure 19) reprend le cheminement des différents points effectués avant la comparaison finale entre le nuage de points du MLS et celui du TLS. Tout d'abord, il faut rappeler que le site d'étude joue un rôle essentiel dans le résultat, ainsi, le produit fini peut varier si le site est différent. Cependant, dans ce cas-ci, l'ensemble des analyses lors de cette étude provient des mesures réalisées dans le bâtiment B5b du campus du Sart-Tilman de l'Université de Liège, donc le site d'analyse n'est pas un paramètre variable dans ce travail et n'exerce pas une influence majeure sur le résultat.

Certains paramètres variables ont une influence sur la qualité globale du nuage consolidé. Dans ce travail, les trois paramètres suivants sont analysés :

1. la vitesse d'avancement ;
2. la complexité du cheminement ;
3. l'assemblage des différents nuages de points entre eux.

Tout d’abord, les configurations optimales de ces trois paramètres sont déterminées pour les utiliser afin d’effectuer une comparaison entre le nuage de référence (obtenu au moyen du TLS) et les nuages consolidés du MLS.

Des analyses **qualitatives** et **quantitatives** sont réalisées pour l’ensemble des points. L’analyse qualitative est une simple analyse visuelle des nuages de points entre eux. L’analyse quantitative se fait sur la base des résultats obtenus à l’aide des méthodes de point to point et de cloud to mesh.



Ce schéma (Figure 20) montre grossièrement l’orientation du lieu de prises de mesures et les différentes cibles relevées aux deux étages et a pour but d’aider le lecteur dans la compréhension de la discussion. Dans ce cas, l’orientation réelle du schéma est vers le nord-ouest, mais pour des questions de simplifications l’orientation est imposée avec le haut du schéma vers le nord. Les identifiants des scans sont également ceux utilisés lors des mesures à la station totale. Cependant, il faut noter qu’il n’y a pas de point 107 ni de point 111 car il s’agit d’erreurs qui sont apparues lors du relevé à la station totale.

5.1.1 Description de l’analyse qualitative

L’analyse qualitative se réalise en deux étapes. Premièrement, les nuages de points sont comparés visuellement entre eux en comparant le rendu visuel des scans. Dans cette partie, la densité des nuages de points et la facilité de reconnaître des géométries de différentes tailles sont analysées. Dans un second temps, les résultats visuels des traitements par la méthode de cloud to mesh sont comparés à l’aide des “scalar field“ qui, pour rappel, colorient les nuages de points en fonction de leur distance

par rapport au maillage de référence. De cette manière, il est possible de mettre en évidence certaines zones, qui connaissent des problèmes, dans les différents scans.

5.1.2 Description de l'analyse quantitative

L'analyse quantitative compare statistiquement les résultats obtenus par les deux méthodes utilisées, c'est-à-dire la méthode point to point et la méthode cloud to mesh.

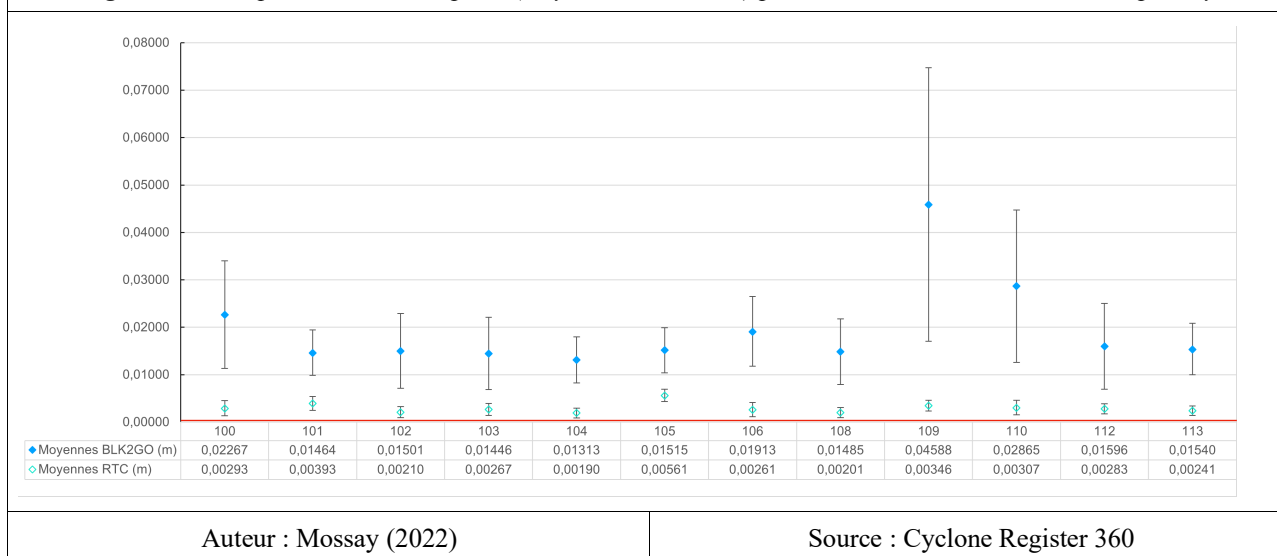
5.1.2.1 Point to point

Cette partie présente d'une part la précision des différentes cibles pour le RTC 360 (TLS) et pour la moyenne du BLK2GO (MLS), dans le but de comparer la précision globale des deux appareils, et, d'autre part, une analyse de l'erreur moyenne de toutes les cibles par scan, ce qui permet de comparer les différents scans entre eux. Tous les résultats sont donnés en coordonnées planimétriques (XY) et en altitude (Z) afin de mieux différencier les erreurs. Tout d'abord, les moyennes et les écarts-types ont été calculés à l'aide des fonctions MOYENNES et STDEVA sur Excel™. A la suite de ces premiers calculs, les intervalles de confiance ont pu être facilement déterminés avec une probabilité de 95 % selon la formule suivante :

Intervalle de confiance				
$\left[\bar{x} \pm z * \frac{s_x}{\sqrt{n}} \right]$				
Avec	\bar{X} = moyenne de l'échantillon	s_x = écart-type de l'échantillon	$z = 1,96$ (loi Normale à 95 %)	n = nombre d'observations
Source : (Donnay, 2018)				

L'ensemble des données brutes est fourni dans les tableaux présentés en annexe (Fichier annexe 4.2). Précédemment à la comparaison des différents scans entre eux, une analyse moyenne de tous les scans du BLK2GO est comparée aux résultats du RTC 360. Cela permet de donner une première impression de la précision du BLK2GO par rapport au RTC 360 et également de mettre en évidence certaines cibles qui peuvent poser problèmes dans la suite des opérations. Les scans seront individuellement comparés entre eux dans la suite du rapport.

Figure 21 : Comparaison Point to point (moyennes et IC en m) pour l'ensemble des cibles selon le plan xy



Auteur : Mossay (2022)

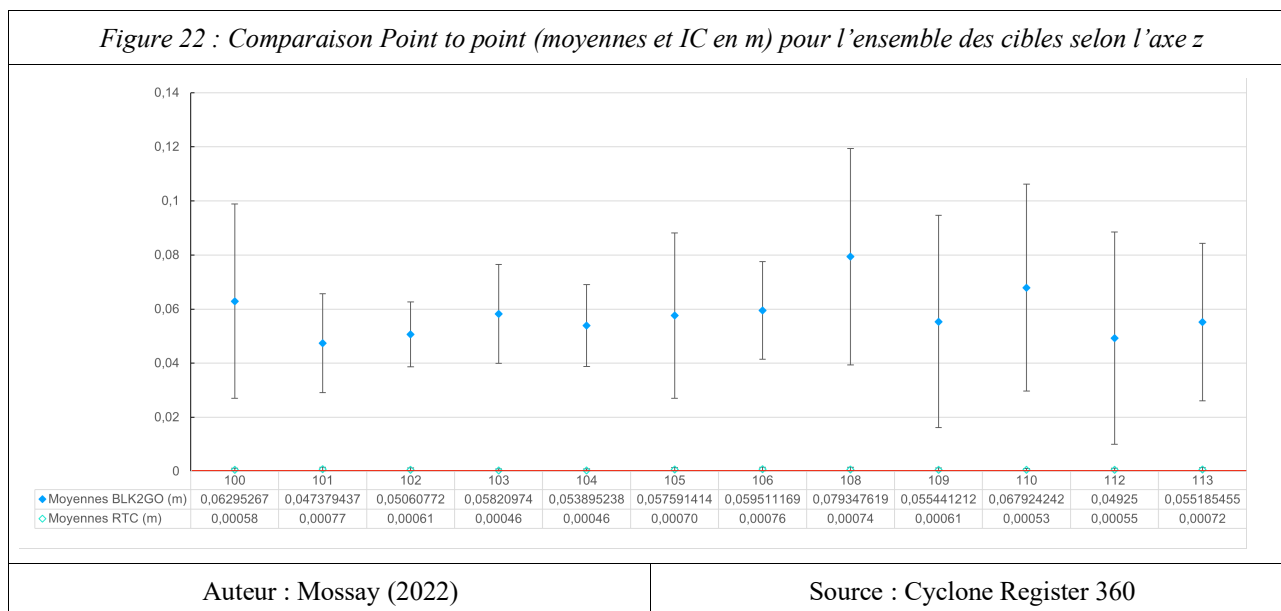
Source : Cyclone Register 360

Ce graphique (Figure 21) permet la comparaison des erreurs moyennes sur les cibles pour le BLK2GO (MLS) en bleu et pour le RTC 360 (TLS) en turquoise. Une première analyse montre que les résultats du RTC 360 sont bien meilleurs que ceux du BLK2GO. L'erreur moyenne pour l'ensemble des cibles est de l'ordre du millimètre pour le TLS et est comprise entre 1 et 5 centimètres pour le MLS. De plus, les intervalles de confiance à 95 % sont très réduits pour les mesures au TLS, ce qui indique une faible dispersion des valeurs.

La majorité de ces cibles mesurées par le BLK2GO connaît une erreur moyenne comprise entre 1 et 2 centimètres et des intervalles de confiance à 95 % plus importants que pour le RTC 360, mais qui restent raisonnables et cohérents entre eux. Certaines cibles, comme la 100, 109 et 110, présentent des moyennes et des intervalles de confiance plus larges que ceux des autres cibles. Néanmoins, une analyse des résultats bruts ne montre pas d'erreur grossière sur l'une ou l'autre mesure. Par conséquent, il s'agit plutôt d'une imprécision du point pour la plupart des scans. Pour la cible 100, l'erreur peut éventuellement s'expliquer par son environnement car cette cible était fixée sur l'encadrement métallique de l'ascenseur, qui par son aspect assez brillant pourrait avoir eu un impact sur les points de relevé de la cible à cause de la réflexion. Les cibles 109 et 110 ont été prises depuis quatre scans différents, dont trois sont les boucles G6, G7 et G19. C'est d'ailleurs, pour ces trois scans que l'erreur est la plus importante aussi pour les autres cibles. De plus, cette erreur constatée correspond aux observations réalisées lors de la comparaison visuelle, pour rappel, une certaine distorsion semble se produire sur la fin du scan de boucles à partir du deuxième étage en direction de l'ouest. Étant donné que la cible 110 se trouve approximativement à la moitié du couloir du deuxième étage et que la cible 109 se situe au premier étage dans la cage d'escalier ouest, là où la distorsion

paraît la plus importante, il semble cohérent avec l'analyse précédente que ces deux cibles comportent les plus grandes erreurs.

Figure 22 : Comparaison Point to point (moyennes et IC en m) pour l'ensemble des cibles selon l'axe z



Auteur : Mossay (2022)

Source : Cyclone Register 360

Pour cette analyse, les valeurs obtenues par le scan G5 ont été supprimées. En effet, à la suite d'une première analyse (Annexe 8), les valeurs obtenues en hauteur (Z) de cette station semblent être impactées par une erreur grossière qui peut provenir d'une mauvaise manipulation de l'appareil ou d'une erreur lors de la retranscription des valeurs. Le G5 n'étant pas utilisé dans d'autres comparaisons, il a été décidé de ne pas tenir compte de ses valeurs dans l'analyse.

Comme pour le plan XY (Figure 21), les valeurs obtenues sur l'axe Z (Figure 22) par le RTC 360 sont très faibles, ce qui montre une bonne précision du TLS. En ce qui concerne les valeurs du BLK2GO, celles-ci sont généralement plus élevées que pour le plan horizontal, avec des erreurs moyennes oscillant entre 4 et 8 centimètres. Les intervalles de confiance ont aussi une ampleur nettement plus large, ce qui indique que les erreurs moyennes sur la hauteur (Figure 22) sont plus importantes que les erreurs moyennes sur le plan XY (Figure 21) pour le BLK2GO.

Plus précisément, pour le BLK2GO, les intervalles de confiance varient assez fortement mais aucun ne présente des valeurs aberrantes par rapport aux autres, ce qui indique qu'il s'agit simplement de fortes variances et non d'erreurs grossières. Les erreurs moyennes varient assez fortement et, seules, trois cibles (100, 108 et 110) connaissent une erreur moyenne qui dépasse la valeur de 6 centimètres (Figure 22). Cependant, aucune explication simple et logique ne permet de comprendre cette différence pour ces points-là, à l'exception de la cible 100, en effet, cette dernière est, comme déjà expliqué auparavant, accrochée à une paroi métallique qui pourrait induire le capteur lidar en erreur à cause de la réflexion. La cible 108 ne présente quant à elle aucune spécificité particulière et l'analyse

des résultats bruts ne présente aucune aberration causée par une erreur grossière. La cible 110 est, quant à elle, placée par terre sur le sol en petit granite qui a une surface assez réfléchissante, ce qui pourrait induire une erreur. Mais il faut préciser que les cibles 106, 109, 112 et 113 sont également placées de la même manière que la cible 110 sur le sol en pierre bleue, ainsi, s’il s’agissait d’une influence du sol, ces cibles devraient en être impactées également.

5.1.2.2 Cloud to mesh

Cette partie présente la comparaison entre les nuages de points du BLK2GO (MLS) avec le maillage créé sur la base du nuage de points du TLS (RTC 360), qui est utilisé comme référence. Les moyennes et les écarts-types sont fournis directement par le logiciel CloudCompare™ et les intervalles de confiance sont calculés à l'aide de la même formule que précédemment. Dans ce cas-ci, il faut prendre en compte le nombre d’observations qui correspond au nombre de points du nuage comparé, ainsi, ce nombre de points très important influence grandement les intervalles de confiance. Les tableaux complets sont fournis en annexe (Fichier annexe 4.1).

5.2 Site d’analyse

5.2.1 Site d’analyse : B5a vs B5b

En premier lieu, il faut se rendre compte du fait que la qualité du nuage de points final est fortement liée au site à relever. Dans cette partie, sont comparés des relevés de deux bâtiments différents, avec des longueurs de parcours, des vitesses d’avancement et un nombre de points sensiblement proches.

Tableau 11 : Comparaison des scans du B5a et du B5b

Bâtiment	Nom du scan	Nombre de points	Temps de mesure (min)	Longueur de la trajectoire (m)	Vitesse (m/s)	Description
B5b	G6	104 271 565	15,2	329,180	0,36	Boucle couloir étage 0 et 1
B5a	G12	112 491 452	18,5	398,377	0,36	Tour complet étage 1 et 4 du B5a

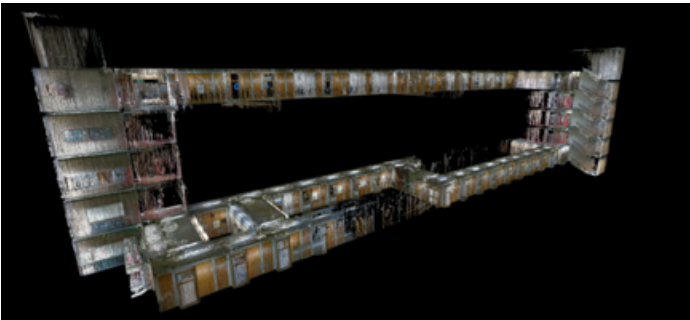
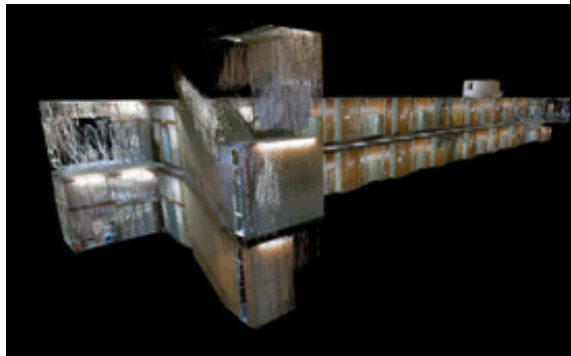
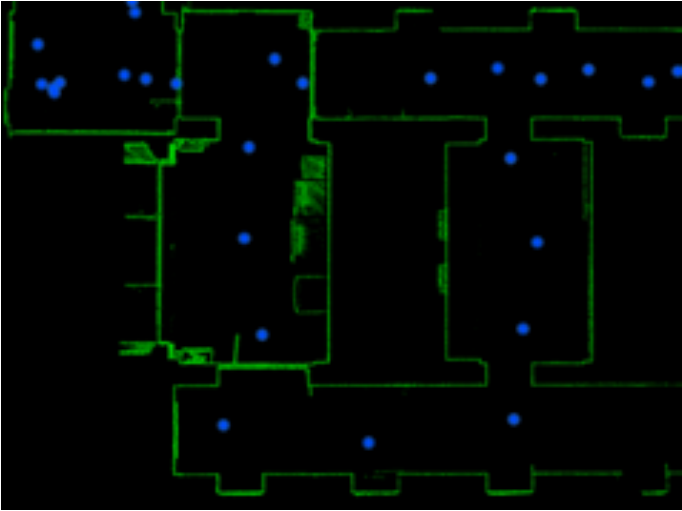

Pour cette comparaison, la boucle réalisée au B5a (G12) (Figure 23) et la boucle “simple“ réalisée au B5b (G6) (Figure 24) sont utilisées car elles présentent des paramètres fort similaires. De plus, toutes deux présentent des caractéristiques semblables et sont des boucles avec une complexité identique car elles passent par deux cages d’escalier et deux couloirs avant de revenir au même point de départ.

Étant donné que le B5a n'a pas été relevé à l'aide de la station totale et du RTC 360 (TLS), il n'est pas possible de réaliser une comparaison poussée. Dans ce cas, seule, la fermeture de la boucle en repassant par le point de départ peut être comparée quantitativement.

5.2.1.1 Comparaison Qualitative

Étant donné que dans ce cas les deux nuages de points ont été relevés avec le même appareil, ils présentent des caractéristiques similaires dans des environnements et des conditions comparables, il n'existe pas de différence qualitative significative entre les deux nuages de points.

5.2.1.2 Comparaison Quantitative

<i>Figure 23 : Nuage de points du B5a</i>	<i>Figure 24 : Nuage de points du B5b</i>
	
<i>Figure 25 : Coupe B5a</i>	<i>Figure 26 : Coupe B5b</i>
	
Auteur : Mossay (2022)	Source : Cyclone Register 360

Les deux coupes aux figures 25 et 26 représentent les zones de départ et de fins des scans, où il y a une superposition des nuages de points entre le premier et le deuxième passage. La coupe du B5a et

une analyse plus poussée du nuage de points ne permet pas de déterminer un quelconque décalage significatif. Il semble donc que la superposition soit presque parfaite entre le début et la fin du scan dans ce cas, ce qui montre qu'en théorie il n'y a pas de déformation du nuage de points. Une analyse plus poussée sur ce site n'est toutefois pas possible car ce bâtiment n'a pas été mesuré avec d'autres appareils. La coupe du B5b montre un décalage planimétrique de plus de vingt centimètres entre le nuage de points du premier passage et celui du deuxième passage. Le même décalage, mais avec des ordres de grandeur différents, est observé sur toutes les boucles de ce bâtiment (G6, G7 et G19).

Il est impossible de correctement prédire la qualité du résultat final. D'après le fournisseur du BLK2GO, il est possible d'observer un décalage sur de longues distances ou en fonction des caractéristiques de l'endroit (Van Genechten, 2022). Cependant, l'erreur observée sur le site du B5b semble très importante et ne permet à priori pas d'utiliser ce nuage de points tel quel. Étant donné que l'observation faite au B5b a été réalisée de la même manière sur l'ensemble des scans du même type, il est possible d'exclure une erreur grossière. Au contraire, le site du B5a ne présente pas d'erreur visible à l'œil nu, ce qui surpasse les attentes du laserscan. Un seul scan y a été réalisé, ainsi, ce très bon résultat peut être le fruit du hasard. Pour en être certain, il faudra réitérer les prises de mesures. Il doit donc y avoir une erreur systématique, qui s'est produite lors des scans dans le bâtiment B5b, dont l'origine est encore inconnue.

Cette comparaison démontre donc que le site d'analyse joue un rôle prépondérant et qu'il n'est pas possible de déterminer le résultat à l'avance. Il est donc essentiel de mettre en place une stratégie pour obtenir un résultat acceptable, indépendamment du site d'analyse.

5.3 Paramètres variables

Dans cette section, les différents paramètres susceptibles d'influencer la qualité du nuage de points final sont discutés. Ces paramètres dépendent de la méthodologie appliquée lors du relevé mais aussi des post-traitements effectués sur les nuages de points. L'objectif étant d'obtenir la meilleure précision possible, les différents paramètres sont comparés pour déterminer la meilleure technique à utiliser.

5.3.1 Vitesse d'avancement

La vitesse d'avancement est la vitesse à laquelle l'opérateur se déplace lors de la prise de mesure. Pour le test de ce paramètre, deux essais ont été réalisés en effectuant deux relevés identiques mais avec des vitesses différentes.

Tableau 12 : Scans avec variation de vitesse

Test	Nom du scan	Nombre de points	Temps de mesure (min)	Longueur de la trajectoire (m)	Vitesse (m/s)	Description
1	G1	23 749 920	4,0	114,244	0,48	Couloir étage 0 (rapide)
	G2	59 251 724	8,9	152,858	0,29	Couloir étage 0 (lent)
2	G6	104 271 565	15,2	329,180	0,36	Boucle couloir étage 0 et 1 (lent)
	G7	53 632 897	8,0	275,295	0,57	Boucle couloir étage 0 et 1 (rapide)

Le premier test porte sur le rez-de-chaussée du B5b avec les scans G1 et G2. Pour le scan G2, la vitesse d'avancement a été fortement réduite. Les chiffres indiquent que le temps de prise de mesure est au moins doublé et que, par conséquent, le nombre de points relevés connaît la même variation étant donné que le nombre de mesures dépend de la durée du scan.

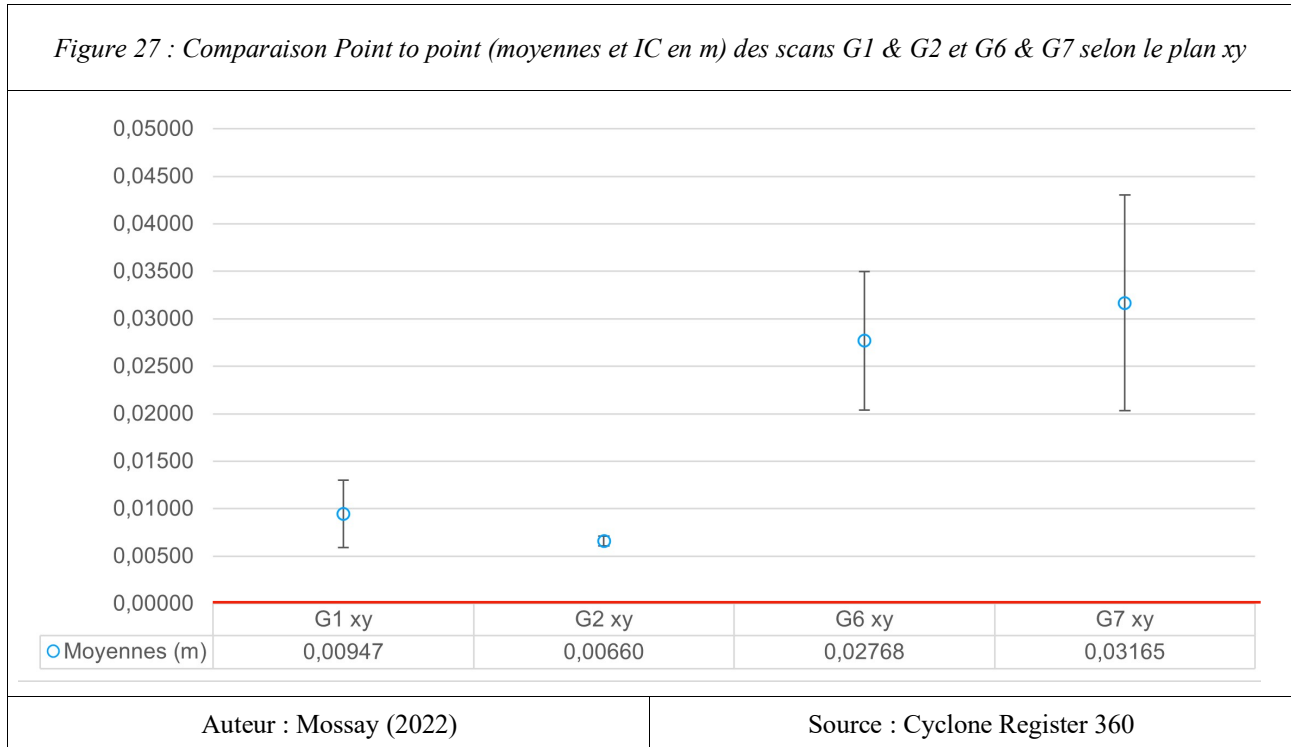
Le second test porte sur une boucle passant par les deux couloirs et les deux cages d'escalier en revenant au point de départ avec une superposition du nuage de points. Dans ce cas, scan G6 est réalisé avec une plus faible vitesse d'avancement et le G7 est le scan plus rapide. Comme pour le premier test, le temps de mesure du G6 est presque deux fois plus long que le scan le plus rapide et donc le nombre de points relevés est également presque deux fois supérieur.

5.3.1.1 Comparaison qualitative

Étant donné que les nuages de points avec une vitesse d'avancement plus rapide ont à peu près deux fois moins de points pour la même zone relevée, la densité est nettement plus faible pour ces scans et donc il est plus difficile de détecter des petits objets ou des détails des diverses géométries.

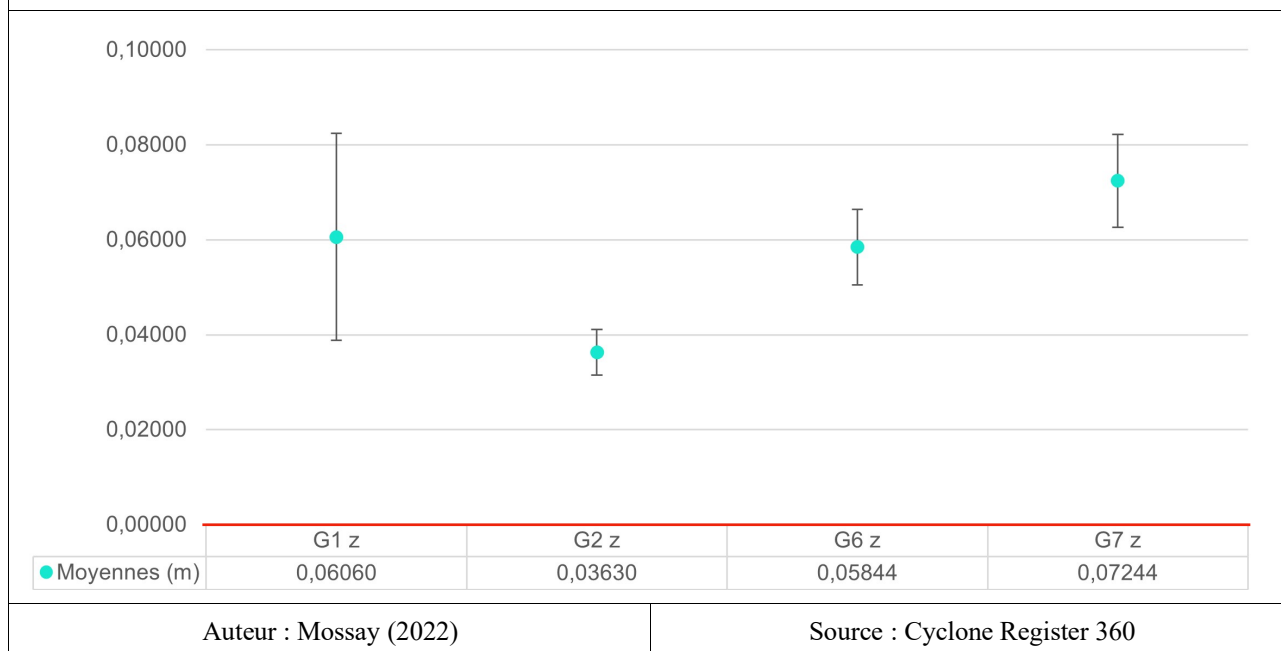
5.3.1.2 Comparaison quantitative

5.3.1.2.1 Point to point



Ce graphique représente les erreurs planimétriques moyennes des cibles pour les quatre scans des deux tests. Pour le premier test, la différence entre le scan rapide (G1) et le scan lent (G2) se marque par une différence inférieure à un demi-centimètre. La variation la plus importante réside dans le fait que l'intervalle de confiance à 95 % est nettement plus large pour le scan rapide, avec un ordre de grandeur de quelques millimètres. Pour le second test, la différence entre le scan rapide (G7) et le scan lent (G6) se constate également par une différence proche du demi-centimètre. Mais, dans ce cas, l'intervalle de confiance est très large pour les deux scans, avec un intervalle de confiance à 95 %, de plus d'un demi-centimètre pour le scan G6 et d'approximativement un centimètre pour le G7. Cependant, la précision entre les deux tests est significativement différente et indique qu'un autre facteur influence cette précision. Par exemple, le scan G2 et G6 ont des vitesses d'avancement similaire mais la précision du G2 est nettement supérieure à celle du G6. Comme les mesures ont été réalisées dans le même bâtiment avec des conditions similaires, la seule différence entre les deux tests est la complexité du parcours avec une longueur plus importante pour le G6 et le changement de niveaux.

Figure 28 : Comparaison Point to point (moyennes et IC en m) des scans G1 & G2 et G6 & G7 selon l'axe z



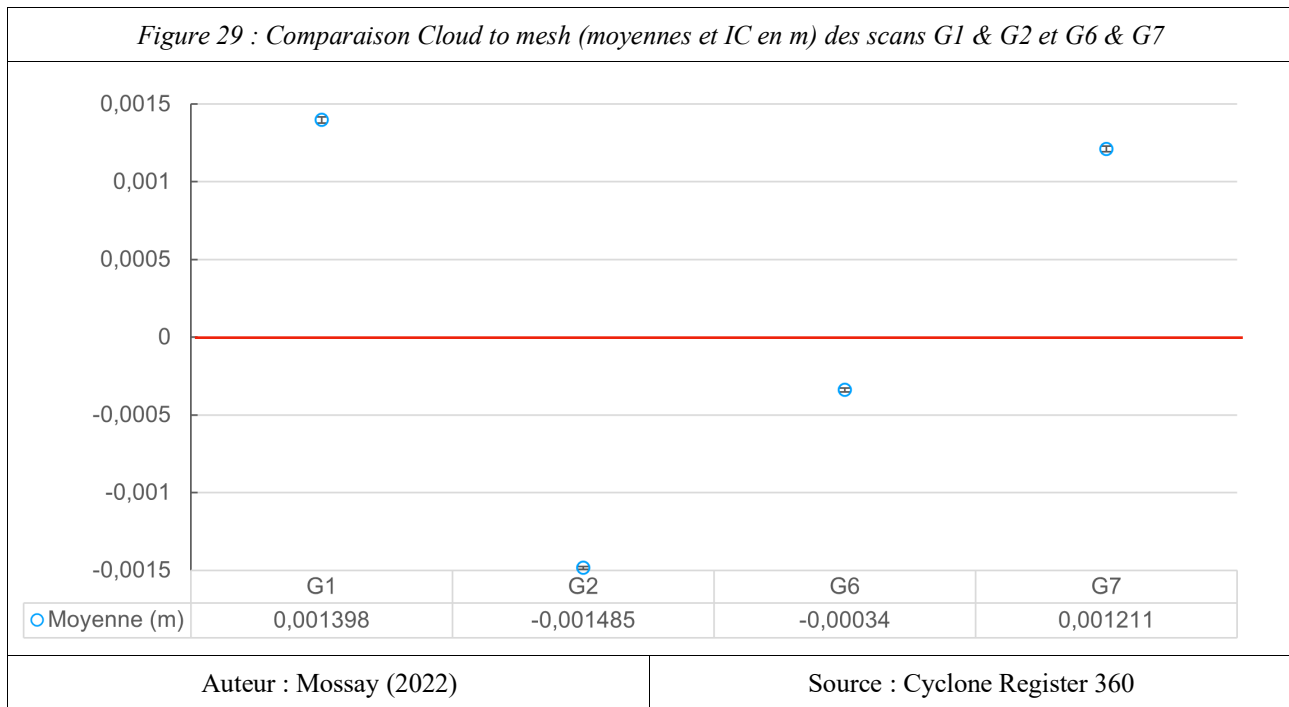
Auteur : Mossay (2022)

Source : Cyclone Register 360

Ce graphique représente les erreurs altimétriques moyennes des cibles pour les quatre scans des deux tests. À l'identique des erreurs planimétriques, les erreurs altimétriques sont inférieures pour les scans avec une vitesse d'avancement moindre. Mais, de manière générale, les erreurs altimétriques moyennes sont sous la valeur de deux centimètres pour les deux tests alors qu'elles varient entre cinq et trente millimètres pour les erreurs planimétriques moyennes. Comme pour l'erreur planimétrique, le G2 a une meilleure précision que le G6, mais cette fois-ci le G1 a une moins bonne précision que le G6. Cela peut peut-être s'expliquer par une erreur altimétrique importante du G1, qui a une moyenne plus élevée de deux millimètres que le passage lent et un intervalle de confiance plus important que tous les autres scans.

De manière générale, dans ce travail, les scans avec une vitesse plus lente sont donc plus précis que des scans équivalents avec une vitesse d'avancement plus rapide. Néanmoins, il est nécessaire de souligner la présence d'une différence importante entre les tests qui ne semble pas être liée seulement à la vitesse d'avancement mais également à la complexité du parcours.

5.3.1.2.2 Cloud to mesh statistique



Ce graphique indique les distances moyennes et les intervalles de confiance des nuages de points du BLK2GO avec le maillage sur la base du nuage du RTC 360. Les intervalles de confiance sont néanmoins très étroits à cause du nombre très important de points, de plusieurs centaines de millions, et des écarts très petits allant au maximum à quelques dizaines de centimètres de manière très localisée.

Concernant le premier test entre les scans G1 (rapide) et G2 (lent), ce n'est plus le scan le plus lent qui présente la meilleure précision contrairement à l'analyse point to point. Les deux scans ont une moyenne d'erreur légèrement supérieure au millimètre mais le scan G1 a une moyenne légèrement plus petite et donc plus proche de la référence. Le deuxième test correspond aux résultats obtenus avec l'analyse point to point, c'est-à-dire que le scan G6 (lent) présente une erreur moyenne en dessous du demi-millimètre et, ainsi, en-dessous de l'erreur moyenne du scan G7 (rapide), qui obtient une erreur moyenne d'un peu plus d'un millimètre.

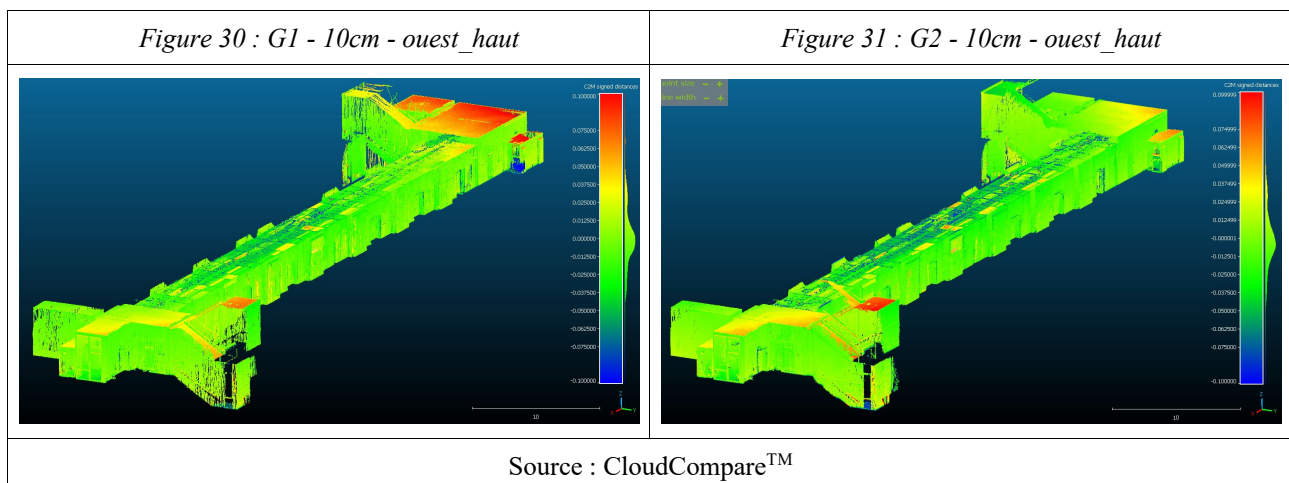
Une deuxième contradiction avec l'analyse point to point se retrouve au niveau des moyennes du test 1 par rapport au test 2. Pour rappel, l'analyse point to point a montré une meilleure précision pour les scans G1 et G2 par rapport aux scans G6 et G7. L'analyse cloud to mesh indique l'inverse, en effet, les scans du deuxième test présentent des erreurs moyennes légèrement inférieures.

Ces résultats peuvent s'expliquer de plusieurs manières :

1. Premièrement, il faut tenir compte du fait que les erreurs moyennes observées sont très petites à cause du nombre très important de points.
2. Pour le test 1, le scan G2 est moins précis que le G1. Cela peut s'expliquer éventuellement par la réalisation d'un nettoyage moins rigoureux du nuage brut, ce qui peut causer cette légère différence.
3. Une autre explication à cette différence de précision du scan G2 par rapport au scan G1, repose sur le fait que les nuages de points ont été alignés au maillage à partir des cibles. Il se peut que certaines cibles aient été moins bien reconnues ou qu'une translation lors de l'alignement ait causé cette légère différence.
4. L'hypothèse d'une translation permet également de justifier pourquoi, dans ce cas, les scans du second test présentent, à priori, une meilleure précision. Comme les nuages de points ont été alignés sur la base des cibles réparties dans les couloirs du bâtiment, il semble logique, dans une vue en trois dimensions, qu'un nombre supérieur de cibles mieux réparties dans l'espace aurait permis un meilleur alignement.

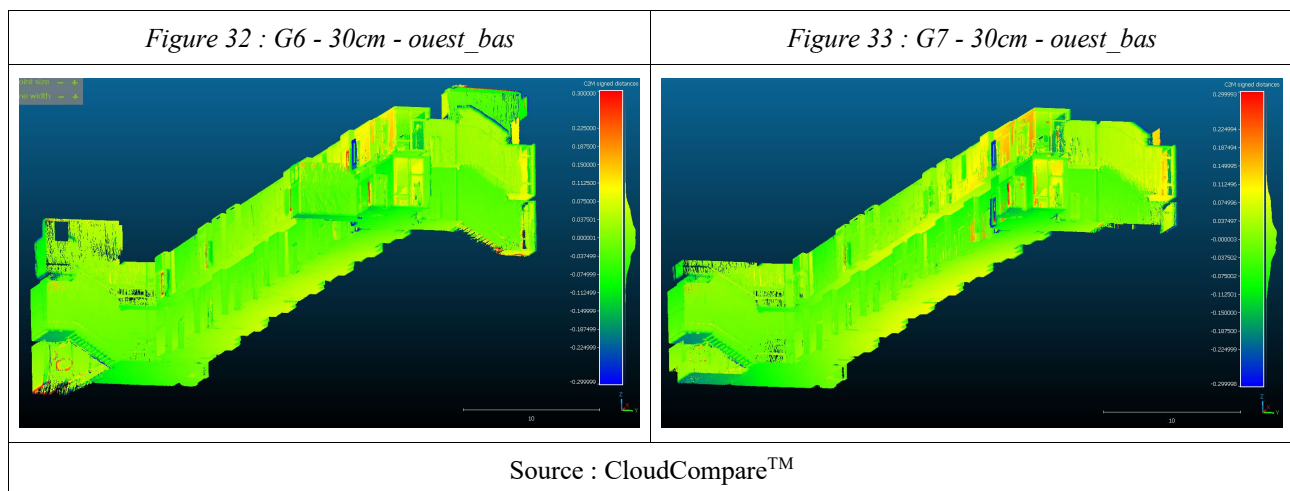
5.3.1.2.3 Cloud to mesh visuel

Cette partie représente les nuages de points avec une échelle colorimétrique en fonction de la distance des points par rapport au maillage de référence, ce qui permet de visualiser les résultats statistiques obtenus et de déterminer où sont localisées les éventuelles déformations.



Sur ces deux vues du haut du côté ouest, sont représentés les nuages de points reprenant le rez-de-chaussée à partir du scan G1, G2 et une partie du groupe 1 (Gr1). L'échelle colorimétrique choisie dans ce cas est identique pour les deux représentations et va de -10 à +10 centimètres. Les points représentés sur ces images sont situés à maximum de 10 centimètres de part et d'autre du maillage.

Cette échelle a été choisie afin de permettre une bonne visualisation des déformations sans supprimer trop de points, ce qui pourrait causer que certaines déformations ne soient plus identifiables. Le départ du scan s'est réalisé à l'extrémité ouest du couloir, dans le coin gauche de l'image. Les plus grandes erreurs se distinguent aux deux extrémités et sont les plus marquées à l'extrémité est du couloir (coin supérieur droit de l'image) pour le scan G1. Après analyse des deux images, l'erreur semble être plus importante pour le scan G1, ce qui ne coïncide pas avec les résultats statistiques obtenus. Ceci peut éventuellement s'expliquer par le fait que les erreurs pour le scan G2 sont plus étalées sur l'ensemble du scan et donc moins facilement détectables à l'œil nu.

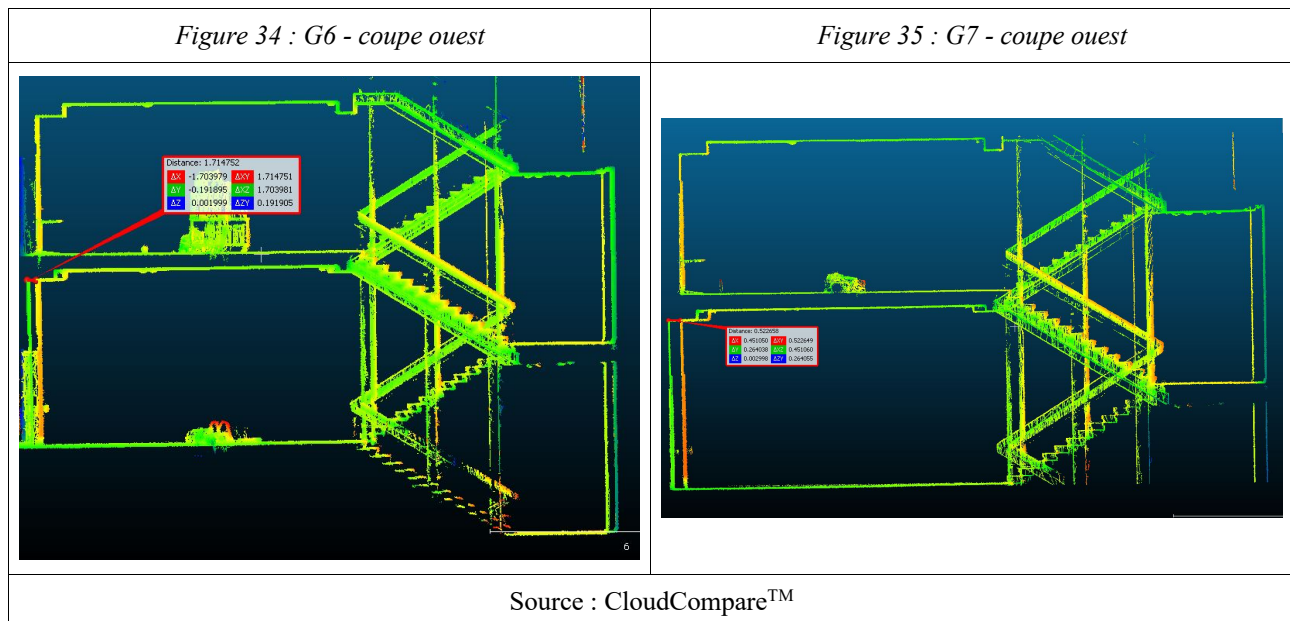


Ces deux figures des scans G6 et G7 (Figures 32 et 33) montrent le tour complet des couloirs sans les laboratoires depuis une vue du dessous au nord-ouest avec une échelle colorimétrique allant de -30 à +30 centimètres. Ces boucles ont été réalisées selon le même schéma avec un départ dans la cage d'escalier ouest du rez-de-chaussée. Ensuite, une traversée d'ouest en est du couloir, pour monter au premier étage par l'escalier est. De là, le couloir du premier étage est traversé d'est en ouest pour redescendre dans la cage d'escalier ouest du rez-de-chaussée en créant un double recouvrement de cette partie (Annexe 5).

Il semble, comme pour l'analyse du rez-de-chaussée, que le scan avec la vitesse de progression la plus lente (G6) présente des erreurs du même type mais sont d'une envergure moindre que pour le passage plus rapide (G7).

Ce point de vue indique clairement une forte distorsion sur les murs nord et sud de la partie ouest du bâtiment. Lors du nettoyage des nuages de points, il avait été constaté un décalage d'une vingtaine de centimètres entre les deux mêmes géométries du double recouvrement, que les parties nord et sud correspondent respectivement au premier et au second passage et que la partie sud semble être fortement alignée avec les murs du premier étage. Comme les cibles utilisées pour le

géoréférencement sont celles du premier passage, il semble normal que le mur nord du rez-de-chaussée ne comporte pas d'erreur significative. Cependant, les traits rouges sur les images du G6 et G7 (Figures 32 et 33) derrière ce mur nord montrent ce même mur lors du deuxième passage avec un décalage significatif. Il est intéressant d'observer que le décalage semble s'accroître fortement à partir du milieu du premier étage. Cette observation ne ressemble pas à une propagation d'erreur classique car elle se réalise uniquement sur la fin du scan.



Sur ces coupes du côté ouest (Figures 34 et 35), il est possible de clairement observer le décalage créé lors de la fin de la boucle. Pour le G6 (Figure 34), un décalage d'une vingtaine de centimètres entre le mur nord, à gauche, et le mur sud, à droite, est visible. Pour le G7 (Figure 35), cette même erreur a une ampleur d'approximativement 26 centimètres. Dans les deux cas, le décalage semble cependant se faire uniquement en planimétrie et non en altitude.

5.3.1.3 Synthèse

De manière générale, les résultats ont démontré qu'une vitesse d'avancement réduite permet d'obtenir des erreurs moyennes inférieures et donc d'augmenter la précision. Cette conclusion est moins franche avec l'analyse cloud to mesh. Néanmoins, cette méthode d'analyse est plus susceptible d'engendrer des erreurs car elle utilise le nuage de points du TLS comme référence, qui est lui-même potentiellement erroné et qui a subi une transformation en maillage. De plus, un risque supplémentaire d'erreur se trouve dans l'étape de l'alignement des nuages avec le maillage. La méthode point to point, qui a comme référence des mesures à la station totale, est considérée comme plus précise et est à privilégier lors de cette analyse.

Les résultats ont néanmoins également montré que la vitesse n'est potentiellement pas le seul facteur influençant la précision. Une autre source d'erreur plus probable est liée à la complexité du parcours réalisé lors du relevé.

5.3.2 Complexité du parcours

La complexité englobe plusieurs termes liés à la trajectoire du relevé. Par exemple, la complexité comprend la longueur du parcours qui peut potentiellement jouer un rôle sur le résultat final mais aussi la trajectoire en elle-même. En effet, si la trajectoire contient beaucoup de changements de directions ou de niveaux, cela peut également avoir un impact. Pour finir, l'environnement influence également, si la trajectoire passe dans un environnement moins favorable au laserscan ou par un endroit avec peu de recouvrement entre les différentes parties, cela peut augmenter l'erreur finale.

Tableau 13 : Ensemble des scans utilisés pour l'analyse de la complexité du parcours

Nom du scan	Nombre de points	Temps de mesure (min)	Longueur de la trajectoire (m)	Vitesse (m/s)	Description
G2	59 251 724	8,9	152,858	0,29	Couloir étage 0 (passage lent)
G6	104 271 565	15,2	329,180	0,36	Boucle couloir étage 0 et 1
G11	47 094 245	7,1	119,782	0,28	Couloir étage 1
G19	190 909 577	27,3	601,911	0,37	Tour complet (couloirs + pièces)

Les quatre scans ci-dessus ont été sélectionnés pour mettre en évidence l'impact de la complexité de la trajectoire. Il s'agit du scan G2, qui est le scan du rez-de-chaussée, le scan G11, qui est le scan du premier étage, le scan G6, qui est le scan de la boucle simple passant par les couloirs des deux étages, ainsi que par les deux cages d'escalier, en revenant au point de départ à l'extrémité ouest du rez-de-chaussée et le G19 qui correspond à la même boucle que le G6, sauf qu'il reprend les laboratoires du premier étage en retraversant plusieurs fois le couloir du premier étage. Les quatre scans ont des vitesses d'avancement comparables situées entre 0,29 et 0,37 mètres par seconde, ce qui permet de limiter l'impact de la variation de la vitesse pour cette analyse. De plus, les quatre relevés ont été effectués selon la même méthodologie dans le même bâtiment. Les seules choses variables sont donc la longueur et la trajectoire du parcours.

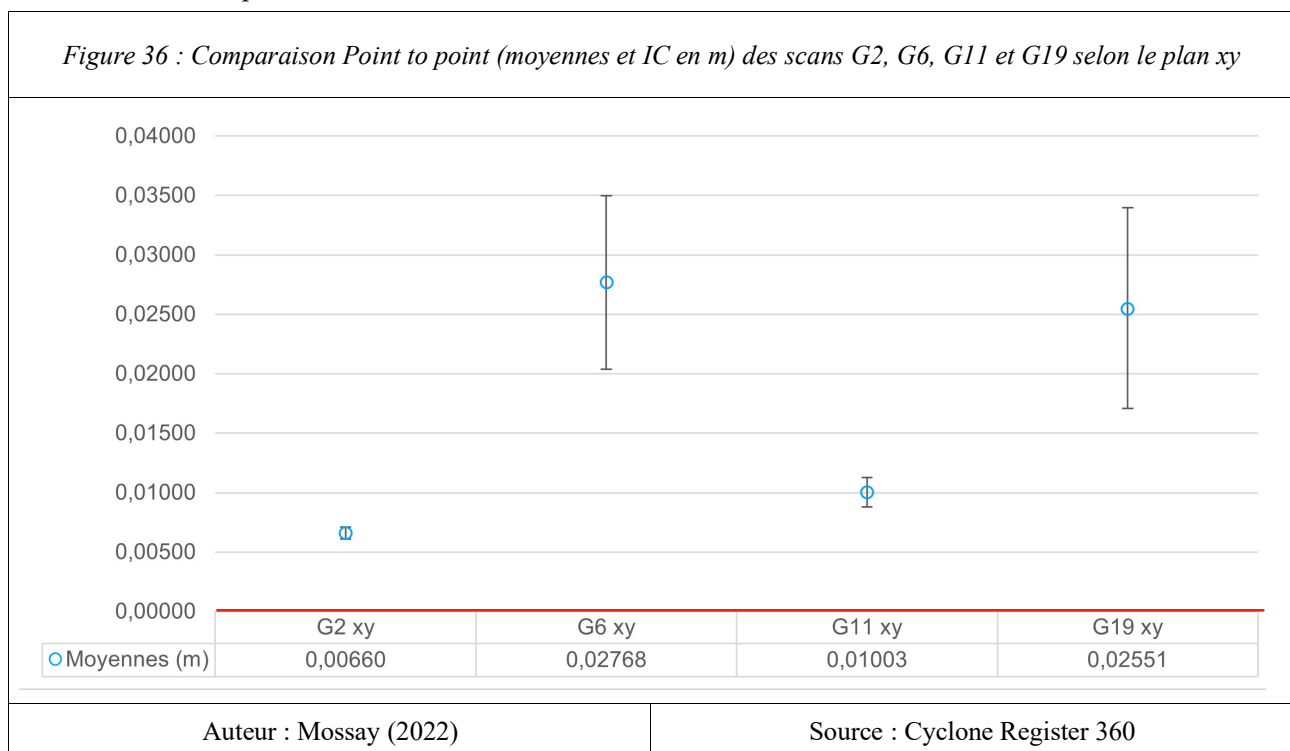
Remarque : D'autres scans, comme le G18 et le G20, avaient été effectués pour comparer l'effet de la trajectoire utilisée lors du relevé. Cependant, le nombre de cibles détectés est insuffisant, rendant l'analyse de point to point et cloud to mesh irréalisables pour ces scans.

5.3.2.1 Comparaison qualitative

Comme pour les cas précédents, il s'agit ici de quatre scans réalisés avec le même appareil avec des vitesses d'avancement similaires et donc des densités de points comparables. Au niveau du rendu des nuages de points il n'y a donc pas de différence flagrante entre eux. La seule chose remarquable consiste en un décalage du nuage de points entre le premier et le deuxième passage au point de départ des scans G6 et G19. Ces décalages indiquent déjà la présence d'une déformation qui s'est produite et qui peut être analysée plus précisément au niveau quantitatif.

5.3.2.2 Comparaison quantitative

5.3.2.2.1 Point to point



Sur le graphique ci-dessus sont représentés les écarts planimétriques moyens additionnés des écarts-types pour obtenir les intervalles de confiance à 95 % des cibles des scans G2, G11, G6 et G19 par rapport aux points mesurés à la station totale.

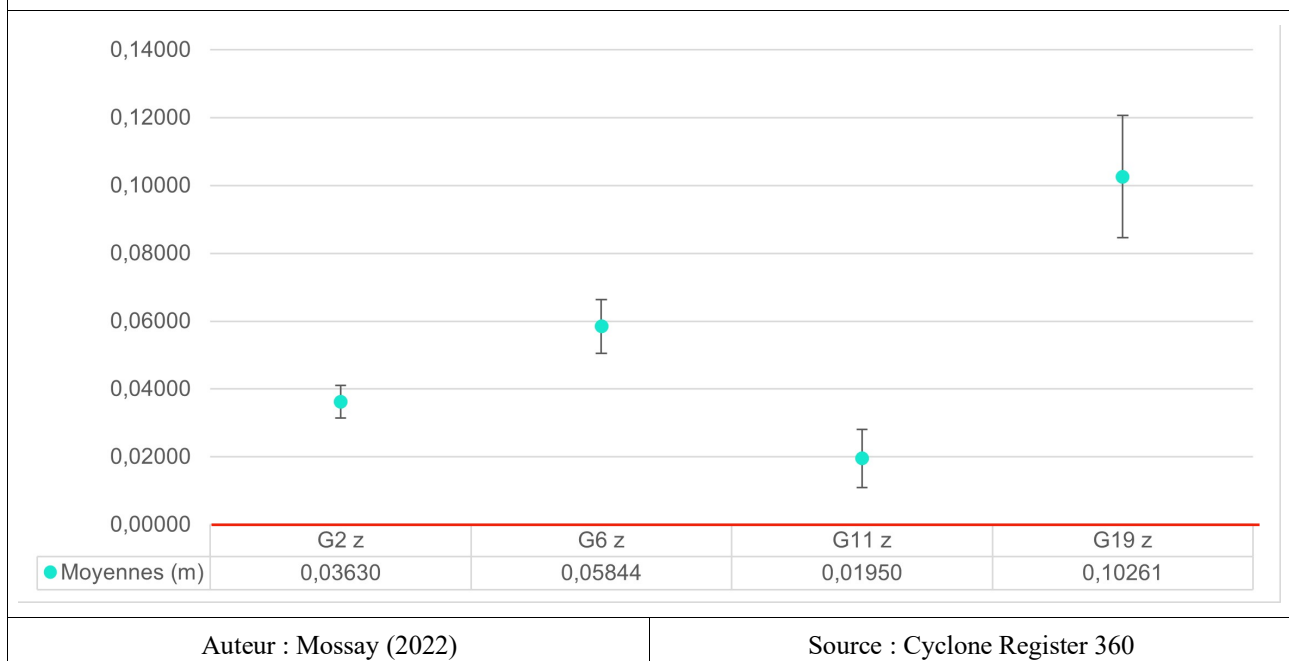
Les plus petits relevés (G2 et G11) présentent les meilleures précisions sur l'ensemble des quatre scans avec des erreurs moyennes de respectivement 6,6 et 10 millimètres et des intervalles de confiance très étroits. Ce qui indique qu'un relevé moins long permet une meilleure précision.

Cependant, le scan G6 est moins précis que le scan G19, avec des erreurs moyennes respectivement de 2,7 et 2,5 centimètres et des intervalles de confiance plutôt importants allant de 2 à 3,5 centimètres pour le G6 et de 1,7 à 3,4 centimètres pour le G19.

L'obtention d'une meilleure précision des scans G2 et G11 face aux deux autres scans plus longs semble cohérente car, de manière logique, par propagation d'erreur, l'écart augmente avec la longueur du scan. Néanmoins, la meilleure précision du scan G19, qui est le scan le plus long de ce test, face au scan G6 ne coïncide pas avec cette hypothèse. Effectivement, le scan G19 est un scan qui a duré presque deux fois plus longtemps et avec une distance parcourue presque deux fois plus longue que celle du scan G6.

Étant donné que la seule chose qui différencie le tracé G19 de celui du G6 est le passage par les laboratoires de physique au premier étage et que les précisions des deux scans sont finalement proches l'une de l'autre, une autre hypothèse semble être que le passage à travers des laboratoires, avec de nombreuses géométries distinctes n'a pas eu un impact négatif réel sur la propagation d'erreur. En effet, ces nombreuses géométries, telles que des tables, des chaises et des outils de laboratoires ont des formes bien spécifiques et peuvent facilement être repérés par le logiciel SLAM, ce qui peut faciliter la reconstruction du nuage de points par le laserscan. L'hypothèse serait donc que le passage par les laboratoires avec le scanner n'ait pas significativement altéré la précision. Ceci expliquerait la raison de la proximité des précisions entre le G6 et le G19.

Figure 37 : Comparaison Point to point (moyennes et IC en m) des scans G2, G6, G11 et G19 selon l'axe z



Auteur : Mossay (2022)

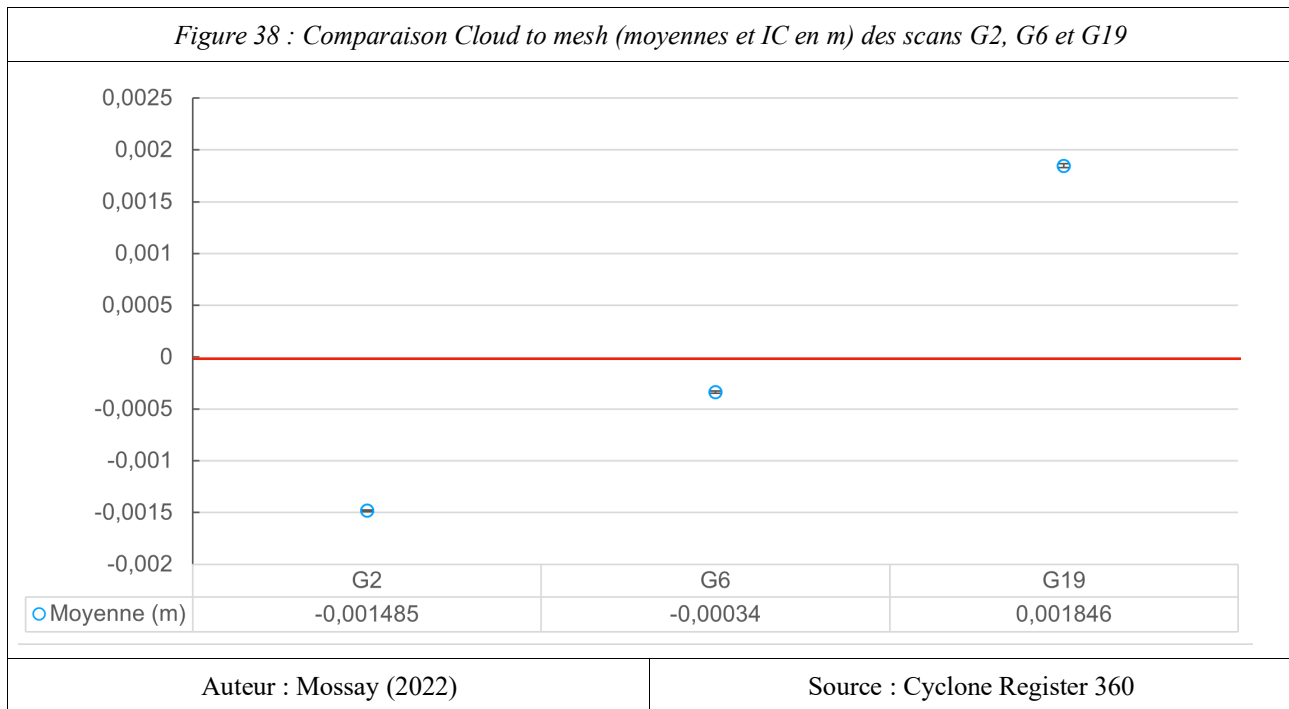
Source : Cyclone Register 360

Sur le graphique ci-dessus sont représentés les écarts altimétriques moyens additionnés des écarts-types pour obtenir les intervalles de confiance des cibles des scans G2, G11, G6 et G19 par rapport aux points mesurés à la station totale. Dans le cas de ces observations, les erreurs altimétriques moyennes varient entre 1,95 et 11 centimètres, contre 0,65 à 3 centimètres pour les erreurs planimétriques. De manière générale, les erreurs altimétriques sont donc plus importantes que les erreurs planimétriques.

Comme pour les erreurs planimétriques, ici aussi les scans G2 et G11 obtiennent les plus petites erreurs moyennes avec respectivement 3,6 et 1,95 centimètres d'erreurs. Mais contrairement à l'analyse précédente, le scan G6 présente une meilleure précision que le scan G19, avec respectivement une erreur moyenne de 5,8 et de 10,3 centimètres. Dans ce cas l'hypothèse que l'erreur augmente avec la distance semble se vérifier. Les intervalles de confiance semblent plus stables entre les différents scans que pour les erreurs planimétriques, même s'ils varient entre quelques millimètres pour le G2 et un peu moins de deux centimètres pour le G19.

Le fait que pour les erreurs altimétriques le scan G6 obtienne une précision nettement supérieure au scan G19 peut contredire l'hypothèse que les différentes géométries des laboratoires aient facilité la reconstruction du nuage de points par le logiciel SLAM. Cependant, comme les différentes géométries sont des meubles assez bas tous au même niveau par rapport à la hauteur des pièces, il se pourrait éventuellement que la reconstruction planimétrique soit facilitée mais qu'en altimétrie, la propagation d'erreur continue avec la distance. Néanmoins, cela reste une hypothèse assez mal comprise, il faudrait donc réaliser d'autres tests pour mieux interpréter ces résultats.

5.3.2.2.2 Cloud to mesh statistique



Ce graphique montre les distances moyennes et les intervalles de confiance des nuages de points du BLK2GO avec le maillage sur la base du nuage du RTC 360. Les intervalles de confiance sont néanmoins très étroits à cause du nombre très important de points, de plusieurs centaines de millions, pour des écarts allant au maximum à quelques dizaines de centimètres de manière très localisée. Le scan G11 n'est pas repris dans ce graphique car les cibles utilisées pour l'alignement avec le maillage de référence étaient toutes alignées au sol, formant un axe est-ouest. Une rotation s'est, ainsi, produite autour de cet axe ce qui a engendré des erreurs aberrantes. Comme ces erreurs n'étaient donc plus dues à une déformation du nuage de points mais à un mauvais alignement, les résultats du scan G11 ont été exclus de cette analyse.

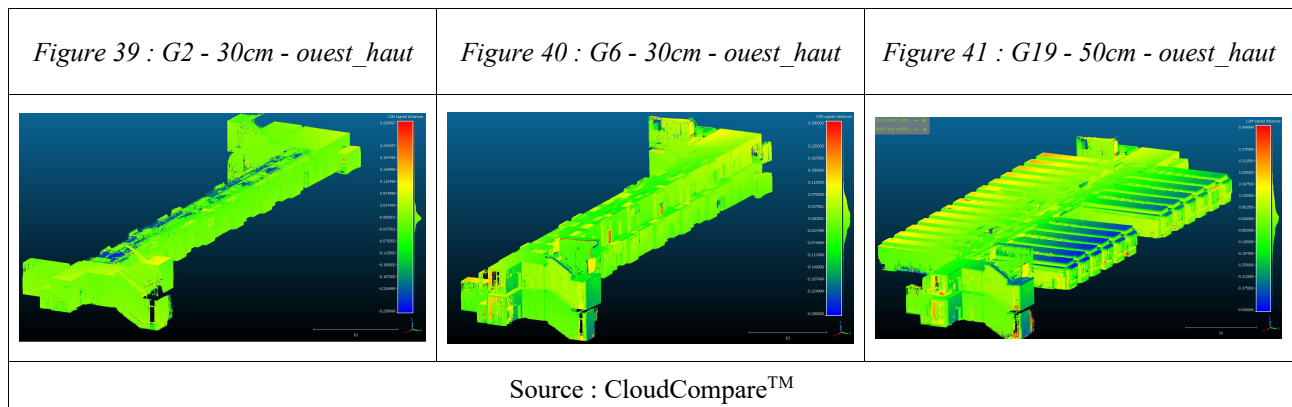
Dans ce cas, l'analyse comparant le G2 et le G6 est identique à celle de la vitesse d'avancement. De manière générale, les erreurs moyennes sont assez faibles, inférieures à 2 millimètres, en raison du nombre de points des nuages analysés. Le scan G2 est moins précis que le scan G6 mais cela peut avoir plusieurs explications qui ne sont pas forcément liées à la complexité du cheminement mais plutôt à la qualité du nettoyage des nuages de points et à la répartition des cibles dans l'espace pour l'alignement entre les nuages de points et le maillage.

L'analyse du scan G6 et G19 est plus aisée, car tous deux reprennent les mêmes cibles et donc l'alignement devrait en théorie avoir fonctionné avec une qualité équivalente. L'erreur moyenne du G19 est de 1,9 millimètres, par rapport à 0,3 millimètre pour le G6 et est donc largement supérieure. Ce résultat pourrait s'expliquer par le fait que l'erreur augmente avec la longueur et la complexité de

la trajectoire du G19. Cependant, il faut à nouveau préciser que les cibles étaient uniquement placées sur la longueur des deux couloirs superposés, ce qui pourrait en quelque sorte créer un axe à grande échelle. Les laboratoires partent perpendiculairement par rapport à cet axe et donc s'il y a eu une légère rotation de cet axe, les laboratoires peuvent éventuellement créer des décalages plus importants plus l'éloignement à l'axe central est grand. Il faut donc vérifier sur les rendus visuels s'il y a effectivement une déformation aux extrémités nord et sud des laboratoires qui pourrait indiquer une rotation. Dans le cas contraire, il y aurait une contradiction avec l'hypothèse établie lors de l'analyse point to point.

5.3.2.2.3 Cloud to mesh visuel

Cette partie représente les nuages de points avec une échelle colorimétrique en fonction de la distance des points par rapport au maillage de référence, ce qui permet de mieux visualiser les résultats statistiques obtenus et de déterminer où sont localisées les éventuelles déformations et donc de mieux comprendre le résultat.

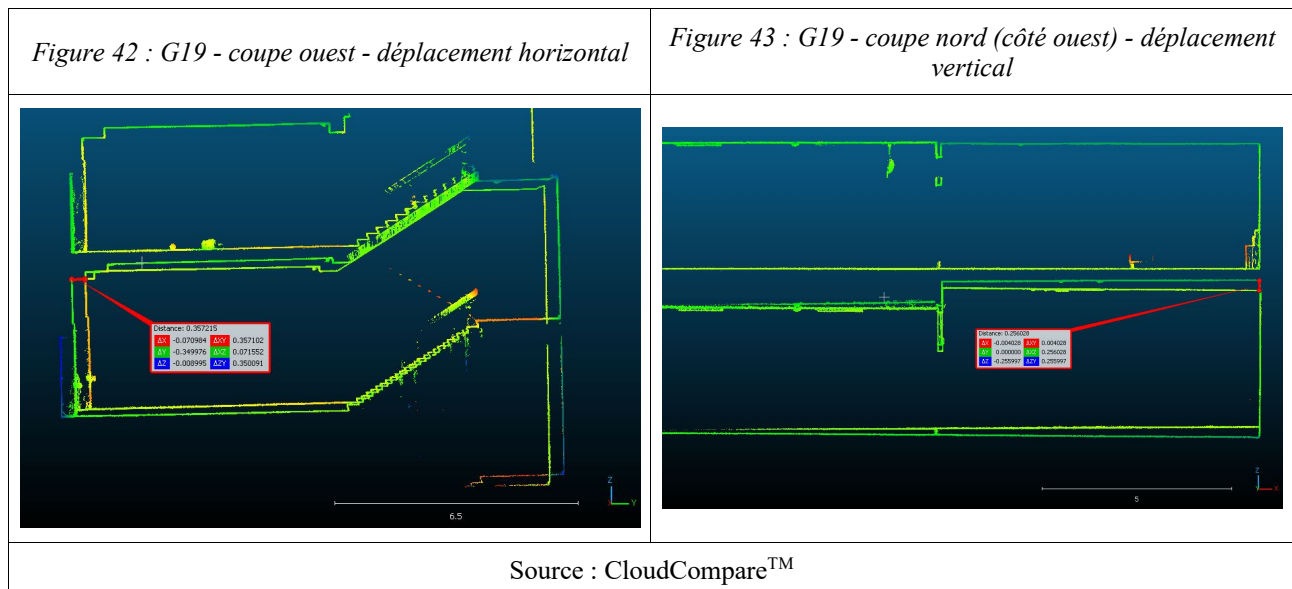


Les trois images ci-dessus (Figures 39, 40 et 41) représentent les nuages de points avec une échelle colorimétrique selon la distance des points par rapport au maillage de référence. Pour les scans G2 et G6, la même échelle de trente centimètres a été choisie, alors que pour le scan G19, une échelle de cinquante centimètres a été sélectionnée car certaines déformations sont assez importantes et pourraient être supprimées avec une échelle plus petite.

L'analyse des scans G2 et G6 a déjà été réalisée lors de l'analyse de la vitesse d'avancement. Des déformations plus importantes se produisent aux extrémités est et ouest des couloirs. Pour le G6, certaines parties en rouge à l'ouest du bâtiment montrent le décalage entre le premier et le deuxième passage de la boucle. Pour le scan G2, une forte variation est observable au-dessus du couloir reliant les deux cages d'escalier. Cette déformation est certainement causée par un mauvais nettoyage du nuage de points. Dans cette partie du bâtiment, il y a un faux plafond avec des lattes de bois légèrement décalés les uns par rapport aux autres, certains points ont donc été mesurés sur le plafond derrière ce faux plafond. Un nettoyage insuffisamment rigoureux peut donc certainement garder des

points de plafond. Cependant, cette erreur ne devrait pas avoir une trop grande importance sur le résultat final, car il s'agit d'une partie du nuage peu dense comparée au nombre très important de points. Ainsi, cette partie ne devrait pas avoir un impact significatif, mais cette situation reste à proscrire pour des projets futurs.

L'analyse du scan G19 montre une déformation importante aux extrémités nord et sud des laboratoires. La particularité de ces déformations est qu'elles semblent être de même intensité, mais de signe opposé. De plus, il y a une symétrie presque parfaite de ces déformations autour de l'axe est-ouest passant par les couloirs. Ce résultat semble donc confirmer l'hypothèse qu'une partie de l'erreur provient d'une légère rotation.



Comme pour les autres boucles réalisées, le G19 possède également des géométries décalées sur la partie ouest du rez-de-chaussée. Dans ce cas-ci, la déformation se réalise sur deux directions de l'espace et non plus seulement sur la hauteur. Un décalage latéral de plus de 30 centimètres et un décalage en hauteur allant jusqu'à plus de 25 centimètres sont observés à l'extrémité ouest. Comme dans les cas précédents, la partie de gauche (nord) correspond au nuage du premier passage et la partie de droite (sud) correspond au deuxième passage qui semble à nouveau être aligné avec le premier étage. Aucun des deux groupes ne présente un décalage majeur. Les seules petites différences observables sont des décalages de 2 à 3 centimètres à cause d'une mauvaise superposition des nuages de points.

5.3.2.3 Synthèse

Dans ce cas aussi, l'analyse point to point donne des résultats plus fiables car l'analyse cloud to mesh comprend également certains problèmes externes à la précision des nuages de points, tels que des problèmes de nettoyage ou de mauvais alignement. Ces erreurs pourraient, cependant, être minimisées avec un meilleur nettoyage et une meilleure répartition des cibles dans l'espace.

De manière générale, l'analyse des scans G2 et G11 par rapport aux scans G6 et G19 semble montrer qu'il y a une grande influence de la longueur de la trajectoire, ainsi, la précision diminue fortement avec l'augmentation de la longueur de la trajectoire.

La différence assez faible entre les scans G6 et G19 semble indiquer que la complexité du chemin parcouru n'a pas forcément un aspect négatif sur la trajectoire. Dans ce cas, l'explication en reviendrait plutôt à l'environnement de travail qui peut avoir un impact sur la reconstruction du nuage de points par le laserscan. En effet, les laboratoires avec des géométries variables ne semblent pas avoir fortement affecté la précision du nuage de points.

L'effet de la complexité de la trajectoire sur la précision est donc un aspect difficile à cerner car il y a un effet assez marqué de la longueur de la trajectoire dans le cadre des analyses effectuées mais pas uniquement. L'environnement joue également un rôle très important pour ce paramètre. En effet, l'analyse du B5a n'avait pas montré d'erreur visible lors de la fermeture de la boucle alors que le scan possède les mêmes caractéristiques de longueur et de complexité.

Une nouvelle hypothèse semble donc être que la différence significative entre les scans G2 et G11, qui sont assez comparables, et les scans G6 et G19, qui le sont également, proviendrait du passage des escaliers du B5b. En effet, c'est la seule différence entre ces deux groupes de scans. Et donc l'erreur proviendrait plutôt de l'environnement que de la complexité de la trajectoire.

Malheureusement, cette hypothèse est difficile à vérifier car la cause est assez mal comprise, en effet, dans le bâtiment B5a le passage des escaliers ne semble pas avoir causé des problèmes lors de la reconstruction du nuage de points. Une explication pourrait être la présence des murs blancs et uniformes dans les cages d'escaliers du B5b, qui rendent la reconstruction difficile dans ces petits espaces où le champ de vision est assez réduit. Cette explication paraît plausible par rapport à la comparaison avec le scan du B5a où les murs des cages d'escalier sont tous recouverts de béton avec des gros granulats, qui peuvent éventuellement faciliter la reconstruction du nuage de points. Cependant, il est, dans ces conditions, impossible d'évaluer l'impact de l'erreur causée par l'environnement et il faut donc trouver une méthode pour contrecarrer cette influence.

5.3.3 Assemblage

Les essais précédents ont montré que la longueur du cheminement peut éventuellement avoir un impact sur la précision du nuage de points ou qu'une erreur peut se faire à un endroit du nuage et ainsi se propager à travers le reste du cheminement. L'assemblage de plusieurs nuages de points, de plus petite ampleur, permettrait donc de limiter l'impact de la longueur du trajet. De plus, en refermant l'assemblage sur le point de départ, il est possible de réajuster les nuages entre eux pour minimiser l'écart de fermeture. Dans le cadre de ce travail, la source d'erreur est supposée être la cage d'escalier, des petits scans individuels de chaque couloir et de chaque cage d'escalier ont donc été réalisés. Ainsi, si le décalage se fait effectivement dans la cage d'escalier, l'erreur ne sera pas supprimée à cet endroit mais en refermant la boucle entre le premier et le dernier scan, tous les nuages de points sont réajustés. Ce procédé devrait fortement réduire l'impact de l'erreur qui s'est produite durant le cheminement.

Néanmoins, l'assemblage des différents nuages de points ne se réalise, en toute logique, jamais vraiment sans erreur. D'une part, il existe toujours une petite erreur qui se produit lors du regroupement car les points communs utilisés pour les assembler ne sont jamais parfaitement identiques. De plus, si un nuage a subi une déformation, l'assemblage peut également être légèrement erroné. Pour ces raisons, il est important d'appliquer une boucle à cette technique en revenant sur le point de départ pour de plus grand scans.

Ainsi, les buts de cette section sont d'analyser l'effet des assemblages sur la précision finale des nuages cumulés et de déterminer si l'erreur ajoutée est moindre à l'erreur de propagation sur la longueur du scan.

Tableau 14 : Ensemble des scans utilisés pour l'analyse des assemblages

Nom du scan	Nombre de points	Temps de mesure (min)	Longueur de la trajectoire (m)	Vitesse (m/s)	Description
G2	59 251 724	8,9	152,858	0,29	Couloir étage 0 (passage lent)
G6	104 271 565	15,2	329,180	0,36	Boucle couloir étage 0 et 1
G11	47 094 245	7,1	119,782	0,28	Couloir étage 1
G19	190 909 577	27,3	601,911	0,37	Tour complet (couloirs + pièces)

Pour l'analyse de l'effet du regroupement de nuages de points, les deux nuages (G6 et G19) sont utilisés comme points de comparaison d'un tour sans les laboratoires et d'un tour complet.

Tableau 15 : Ensemble des groupes utilisés pour l'analyse des assemblages

Nom du groupe	Nombre de points	Temps de mesure (min)	Nombre de scans utilisés	Constituants	Erreur du groupe (m)
Gr.1	157 892 729	24,0	4	G2 + G9 + G10 + G11	0,012
	Description :	Tour complet des deux couloirs sans les laboratoires			
Gr.3	272 750 299	42,9	8	G2 + G9 + G10 + G11 + G14 + G15 + G16 + G17	0,015
	Description :	Tour complet des deux couloirs et des laboratoires du premier étage			
Gr.4	275 372 917	42,1	5	G2 + G9 + G10 + G11 + G18	0,008
	Description :	Tour complet des deux couloirs et des laboratoires du premier étage			

Plusieurs groupes ont été réalisés dans le but d'améliorer la précision du nuage de points final. Les nuages de points de plus petite ampleur qui ont été utilisés pour ces regroupements ont été relevés avec les méthodes offrant une meilleure précision selon les critères vus précédemment, avec une vitesse d'avancement assez lente et des longueurs courtes.

- Le groupe Gr.1 représente une boucle des couloirs des deux étages et les deux cages d'escalier. Il est comparé au nuage de points homologue, le G6.
- Le groupe Gr.3 et Gr.4 sont deux mêmes groupes mais formés différemment. Tous deux représentent le tour complet et sont comparés au G19.
- Le groupe Gr.2 n'a pas été repris dans cette comparaison en raison de la rotation autour de l'axe formé par les cibles du premier étage, qui rend la comparaison cloud to mesh incorrecte.

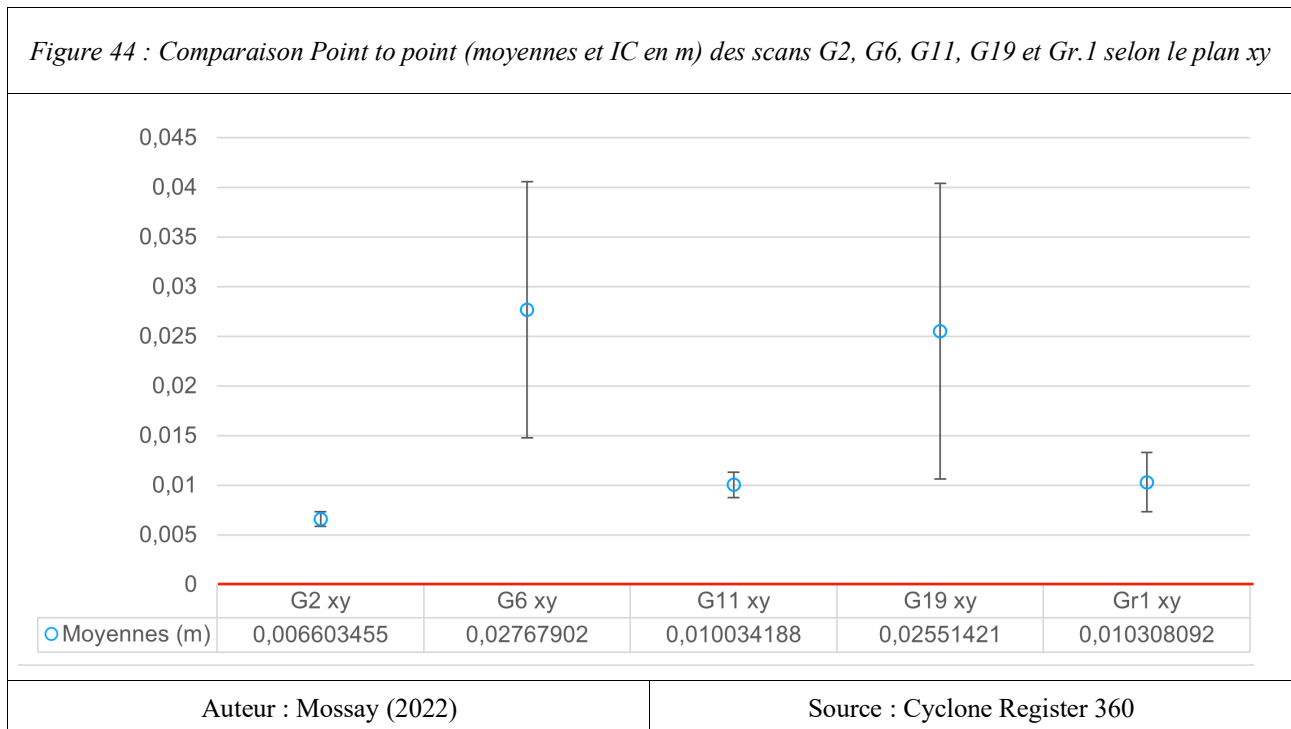
5.3.3.1 Comparaison qualitative

Comme pour les comparaisons précédentes, les différents nuages de points ont été relevés avec le même instrument et il n'y a donc pas une grande différence qualitative entre les nuages. Pour les groupes, certaines parties peuvent éventuellement avoir une densité de points plus élevée aux endroits des raccords entre les nuages de points où les deux viennent se superposer. Néanmoins, une telle augmentation n'est pas vraiment visible à l'œil nu.

5.3.3.2 Comparaison quantitative

5.3.3.2.1 Point to point

Pour l'analyse point to point, seul, le groupe Gr.1 est comparé aux scans uniques car ce groupe se base sur les scans G2, G9, G10 et G11 qui sont également la base de tous les autres groupes et qui contiennent toutes les cibles. Pour l'analyse point to point, tous les groupes ont donc la même précision.

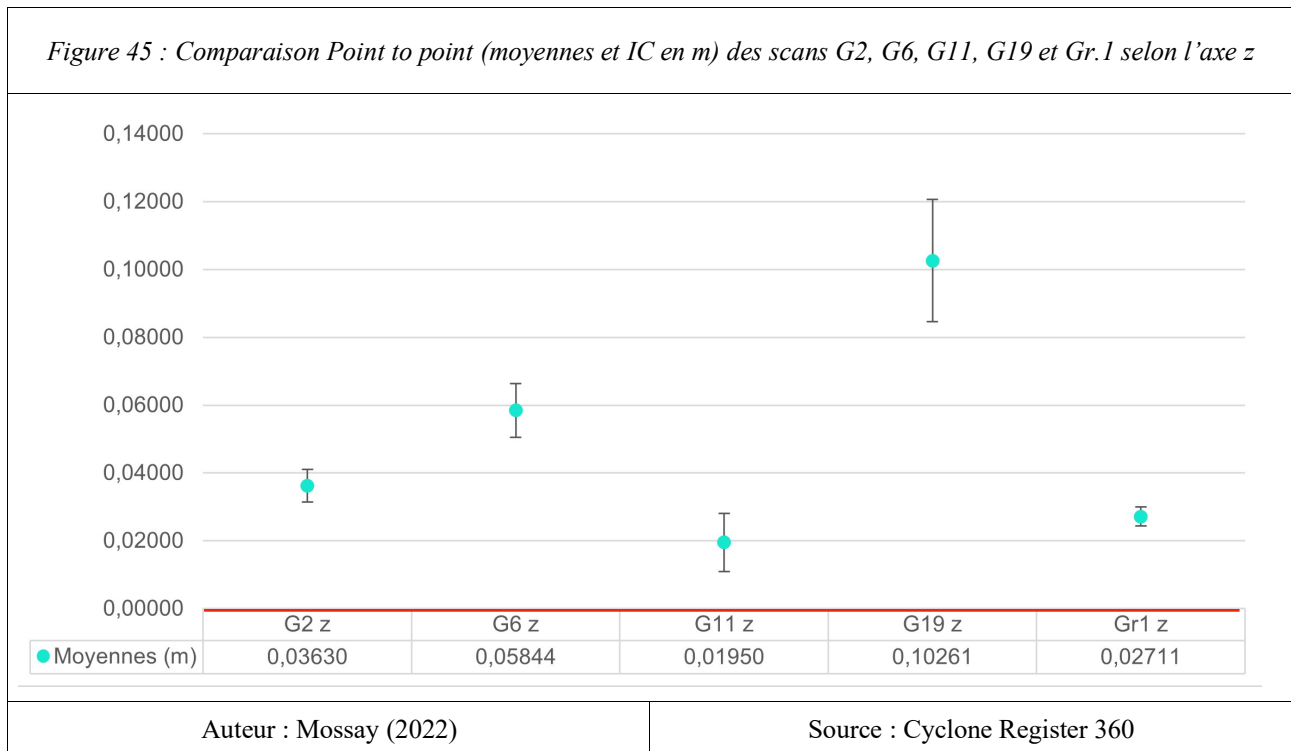


Sur le graphique ci-contre (Figure 44), sont représentés les écarts planimétriques moyens additionnés des écarts-types pour obtenir les intervalles de confiance des cibles des scans G2, G6, G11, G19 et du groupe Gr.1 par rapport aux points mesurés à la station totale. Les analyses concernant les scans uniques ont été réalisées dans les comparaisons précédentes.

Le groupe Gr.1 a une erreur planimétrique moyenne de 1,03 centimètres, ce qui est un très bon résultat comparable aux erreurs moyennes des scans G2 et G11. L'intervalle de confiance est légèrement plus large que les deux scans mais reste tout de même assez proche de la moyenne avec une ampleur de moins d'un quart de centimètre.

En comparant le groupe Gr.1 avec le scan G6, qui est le scan unique équivalent, la différence de précision est très importante. L'erreur moyenne du scan G6 est un peu plus de 2,5 fois supérieure à celle du groupe Gr.1 et l'intervalle de confiance est également nettement plus grand avec une ampleur

de plus d'un demi-centimètre. Comme le scan G6 est fort comparable au scan G19, la comparaison du groupe Gr.1 avec ce dernier donne des résultats comparables.

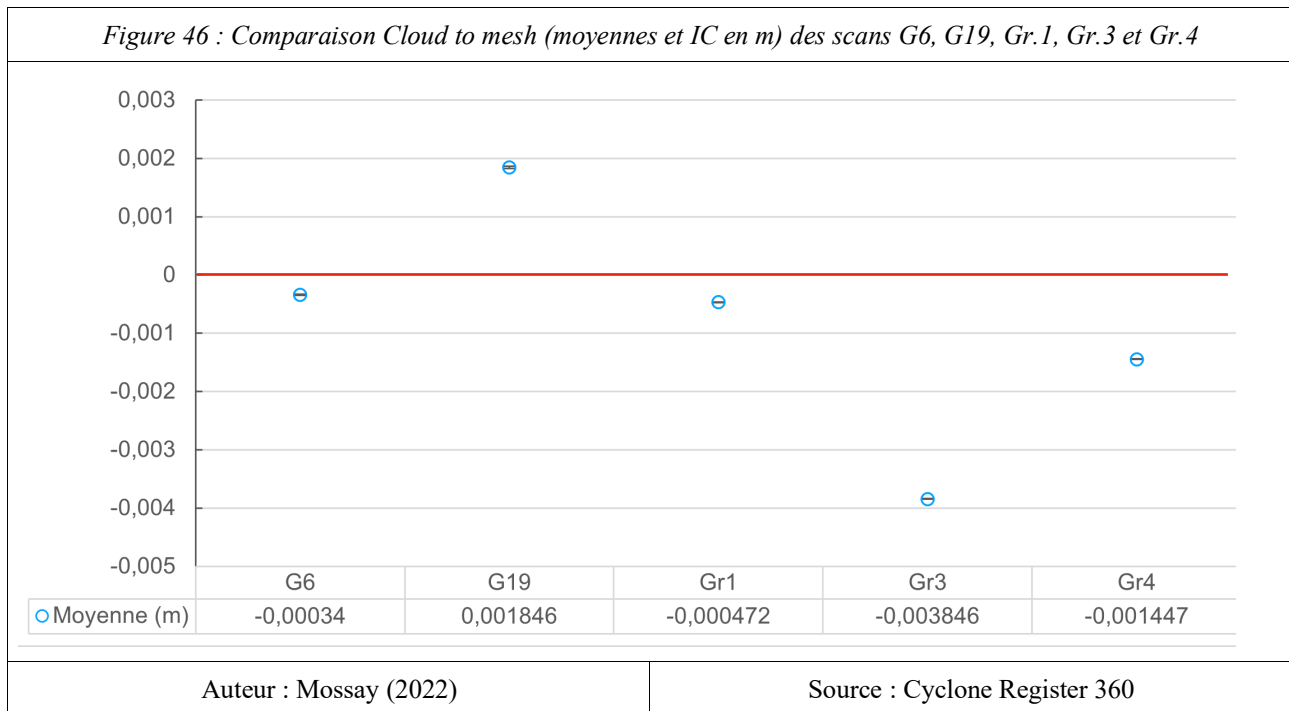


Sur le graphique ci-dessus (Figure 45), sont représentés les écarts altimétriques moyens additionnés des écarts types pour obtenir les intervalles de confiance des cibles des scans G2, G6, G11, G19 et du groupe Gr.1 par rapport aux points mesurés à la station totale. Les analyses concernant les scans uniques ont été réalisées dans les comparaisons précédentes.

L'erreur altimétrique moyenne du groupe Gr.1 est de 2,7 centimètres et donc plus de deux fois supérieure à l'erreur planimétrique moyenne. Comparé aux erreurs des scans G6 et G7, le groupe est cette fois-ci situé entre les deux en étant légèrement moins précis que le G7 et légèrement plus précis que le G6 mais tout en restant fort comparable avec des erreurs moyennes qui varient entre 1,95 et 3,6 centimètres. Toutefois, il faut souligner que le groupe Gr.1 obtient l'intervalle de confiance le plus étroit avec une amplitude de quelques millimètres. Comparé aux scans G6 et G19, le groupe Gr.1 présente une erreur largement inférieure, comme pour l'erreur planimétrique.

La déduction de ces résultats est que la précision d'un ensemble de scans obtient une précision presque équivalente à celle des scans individuels qui le constituent. Contrairement aux scans plus longs réalisés, il ne semble pas y avoir une importante propagation d'erreur.

5.3.3.2.2 Cloud to mesh statistique



Ce graphique (Figure 46) indique les distances moyennes et les intervalles de confiance des nuages de points du BLK2GO avec le maillage formé sur la base du nuage du RTC 360. Les intervalles de confiance sont néanmoins très étroits en raison du nombre très important de points, de plusieurs centaines de millions, pour des distances allant jusqu'à quelques dizaines de centimètres de manière très localisée.

Le groupe Gr.1 et le scan équivalent, G6, obtiennent de très bonnes précisions avec des écarts moyens respectivement de 0,47 et 0,34 millimètres. Le scan G6 est donc légèrement meilleur, mais cette très faible différence peut avoir beaucoup de sources et donc les deux résultats semblent presque identiques.

Pour le tour complet, les résultats sont légèrement différents. Dans cette partie, le scan G19 et les groupes Gr.3 et Gr.4 sont comparés, ils représentent le tour complet du bâtiment avec les deux étages et les laboratoires. Les résultats sont tous largement supérieurs aux résultats de la boucle simple, sans les laboratoires, comme expliqué précédemment dans les comparaisons entre le scan G6 et G19. Le groupe Gr.4 et le scan G19 ont des erreurs moyennes fort comparables avec des valeurs de 1,5 et 1,9 millimètres. Le groupe Gr.4 est cependant légèrement plus précis que le scan G19. Le groupe Gr.3 obtient des résultats inférieurs à ceux des deux autres avec une erreur moyenne de 3,9 millimètres.

La faible différence entre le groupe Gr.4 et le scan G19 semble cohérente en comparaison à la faible différence également entre le scan G6 et le groupe Gr.1. La grande différence entre ces deux tests

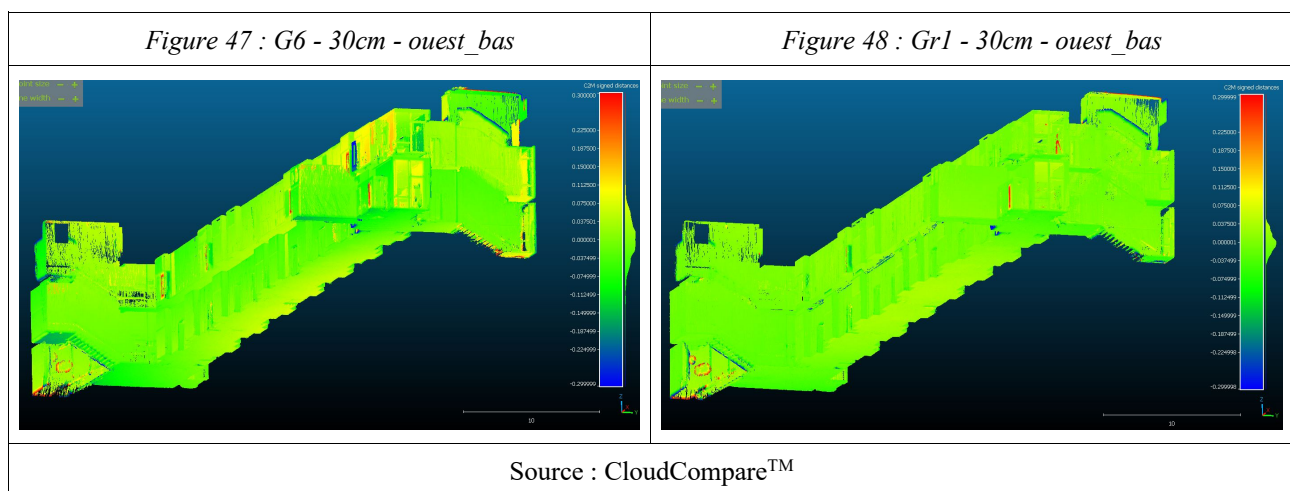
peut, comme déterminé lors de l'analyse de la complexité du cheminement, être due à une faible rotation du nuage de points autour d'un axe est-ouest passant par les couloirs et qui se répercute plus fortement sur les extrémités nord et sud des laboratoires, qui sont les points les plus distants de cet axe.

La mauvaise précision du groupe Gr.3 peut s'expliquer assez facilement par les scans uniques qui le composent. Lors de l'assemblage du groupe, il a été assez difficile de faire correspondre les différents scans des laboratoires (G14, G15, G16 et G17) au scan du premier étage (G11) car les zones de superposition étaient très étroites. Il se peut donc que ces différents scans aient été mal associés, ce qui a créé des erreurs importantes sur le nuage de points final.

Le groupe Gr.4 est composé notamment du scan G18 pour les laboratoires, ce qui n'est pas le meilleur choix concernant les critères discutés dans les analyses précédentes à cause de sa longueur et de sa complexité. Néanmoins, le scan G18 avait suffisamment de zones communes avec le G11 pour pouvoir se raccrocher au reste de la boucle.

Cette analyse permet de déduire que le regroupement des nuages de points n'est pas une solution parfaite mais qu'il permet des résultats équivalents aux scans uniques. Il faut, cependant, faire très attention à posséder suffisamment de zones de superposition entre les différents scans afin que l'assemblage puisse se réaliser dans les meilleures conditions. Pour ce faire, il est possible de contrôler la qualité de l'assemblage dans le rapport fournis par le logiciel Cylone Register 360 (Fichier annexe 3.1) qui montre effectivement un assemblage de moins bonne qualité.

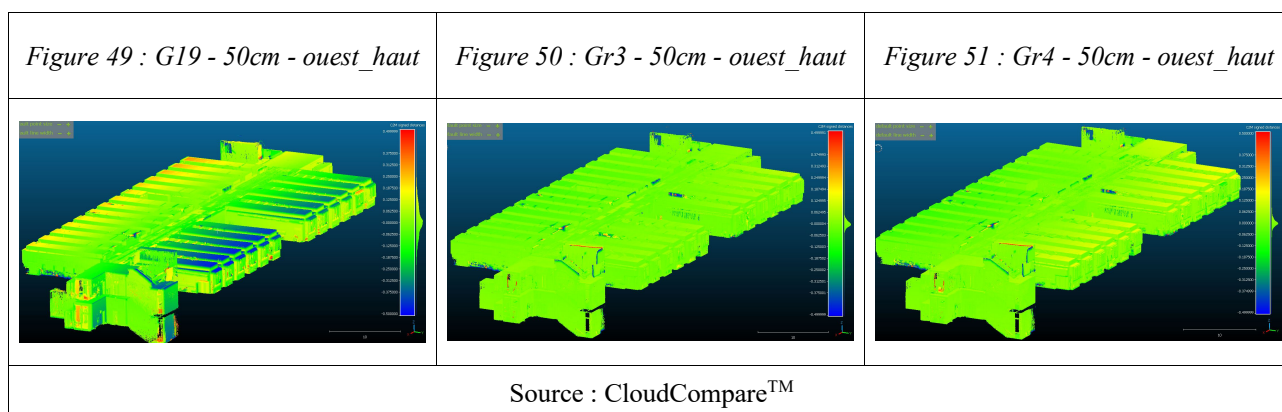
5.3.3.2.3 Cloud to mesh visuel



Les deux images ci-dessus (Figures 47 et 48) représentent les nuages de points de la boucle simple, sans les laboratoires (G6 et Gr.1), avec une échelle colorimétrique selon la distance des points par

rapport au maillage de référence. L'échelle sélectionnée est de trente centimètres ce qui permet une bonne vision des distorsions sans supprimer trop de détails.

Les distorsions semblent être plus importantes sur le scan G6 et essentiellement sur la partie en haut à droite de l'image, qui représente la partie ouest du bâtiment, où la distorsion est la plus forte. Le nuage du groupe Gr.1 contient quelques petites erreurs très localisées qui sont certainement dues à un mauvais nettoyage des nuages de points mais qui ne semblent pas faire partie d'une déformation majeure. Dans l'ensemble le nuage du groupe Gr.1 semble présenter une bonne précision globale.



Les trois images ci-dessus (Figures 49, 50, 51) représentent les nuages de points du tour complet, reprenant les laboratoires (G19, Gr.3 et Gr.4), avec une échelle colorimétrique selon la distance des points par rapport au maillage de référence. L'échelle utilisée est de cinquante centimètres ce qui permet une bonne vision des distorsions sans supprimer trop de détails.

Lors de l'analyse de la complexité du cheminement, une hypothèse suggérait que les distorsions symétriques, du scan G19, autour de l'axe est-ouest étaient causées par une erreur due à une rotation. Le même phénomène est observable pour le groupe Gr.4 mais dont l'ampleur est plus faible. Cette distorsion ne semble, cependant, pas affecter le groupe Gr.3. Ceci peut éventuellement s'expliquer par le fait que l'ensemble des nuages constituant la partie comprenant les cibles (G2, G9, G10 et G11), qui est la composition du groupe Gr.1, ne présente pas une grande erreur de rotation autour de l'axe est-ouest. L'importance de cette erreur dans le groupe Gr.4 pourrait dès lors s'expliquer par le fait que la partie des laboratoires est constituée d'un grand scan (G18) qui a été associé au reste de la boucle. D'après les résultats observés, les groupes semblent donc présenter une meilleure précision globale que les scans uniques.

5.3.3.3 Synthèse

Les résultats obtenus sont assez difficiles à interpréter. D'après l'analyse point to point, la précision des groupes semble fort proche des précisions des scans qui le constituent. Donc dans le cas où des

petits scans simples sont utilisés pour former un grand groupe, la précision devrait rester assez bonne. Cependant, l'analyse cloud to mesh a démontré que la précision globale des nuages de points des groupes est fort proche de la précision des scans uniques de même taille que le groupe. Dans des conditions défavorables, elle peut même être plus mauvaise. Comme pour le groupe Gr.3 où les zones communes entre deux nuages successifs ne sont pas suffisantes pour permettre un bon assemblage. Finalement, l'analyse visuelle des comparaisons cloud to mesh semble indiquer que les groupes obtiennent des erreurs plus faibles que les scans individuels.

Une hypothèse peut être formulée, la formation de groupes ne permet pas d'annuler l'erreur mais permet de la répartir sur l'ensemble du nuage de points. Et, par conséquence, l'ensemble des points s'en retrouverait affecté mais avec une ampleur assez faible et sans grand décalage localisé. Cette théorie expliquerait pourquoi l'analyse point to point donne de bons résultats, car les erreurs centimétriques rencontrées sont étalées sur les centaines de mètres de scan pour donner des résultats suffisants par rapport aux scans uniques. Pour l'analyse cloud to mesh, cela permet également d'expliquer pourquoi, statistiquement, les erreurs des groupes semblent proches des erreurs des scans uniques équivalents alors que les images donnent l'impression d'avoir des erreurs inférieures. Dans le cas de l'hypothèse établie, l'erreur globale resterait fort identique à celles des scans uniques mais, en étant mieux répartie sur l'ensemble du scan, elle serait moins facilement reconnaissable avec l'échelle colorimétrique.

S'il est possible de réduire l'erreur globale sous le seuil de tolérance acceptable déterminé pour le domaine de la construction, la méthode des assemblages en groupe peut éventuellement devenir une solution car le risque d'obtenir de grandes déformations localisées serait plus faible.

5.3.4 Choix de la meilleure technique

La première analyse a démontré qu'une vitesse d'avancement plus lente permet d'obtenir une meilleure précision en plus de fournir des nuages de points plus denses. Ensuite, la deuxième analyse suggère que la réalisation de petits tronçons simples permet également une meilleure précision. Cependant, des erreurs sont causées par l'environnement et il est difficile de les déterminer et plus complexe d'en définir l'ampleur. La formation d'assemblages ne permet pas forcément d'améliorer la précision globale du nuage de points mais limite la présence de déformations importantes localisées, comme cela peut souvent être le cas pour les boucles réalisées avec un seul scan.

Dans le cadre d'une utilisation dans le domaine de la construction, la méthode privilégiée est donc un assemblage de petits scans réalisés avec une vitesse d'avancement faible et avec suffisamment de

superpositions afin de permettre un bon assemblage. Les deux nuages de points qui correspondent à ces critères sont les groupes Gr.1 et Gr.4. Le groupe Gr.1 présente de meilleures précisions mais ne reprend pas les laboratoires et pour ces raisons, le groupe Gr.4 a été sélectionné pour être comparé au tour complet du TLS. Ainsi, il est possible de comparer des scans de taille équivalente relevés avec les deux appareils de mesures.

5.4 Comparaison TLS et MLS

Premièrement, les nuages de points sont comparés entre eux d'une manière globale en se concentrant sur les rendus visuels et les erreurs observables sur les nuages de points. La seconde partie compare de manière plus rigoureuse le nuage de points du TLS (RTC 360) avec celui du MLS (BLK2GO) en appliquant la meilleure technique suivant l'analyse des paramètres variables des scans.

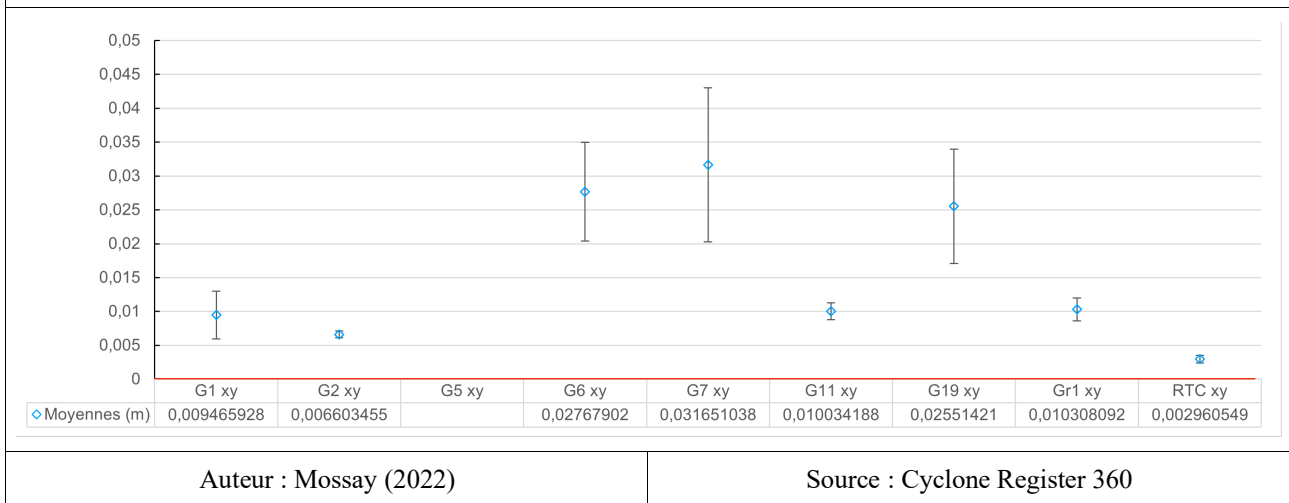
5.4.1 Comparaison globale TLS et MLS

Cette section présente une comparaison statistique qui reprend l'ensemble des scans TLS et MLS et qui permet également de valider le choix d'utiliser le nuage du TLS comme référence pour l'analyse cloud to mesh. Ensuite, une comparaison visuelle permet de visualiser les différences entre les deux types de laserscan.

5.4.1.1 Comparaison statistique

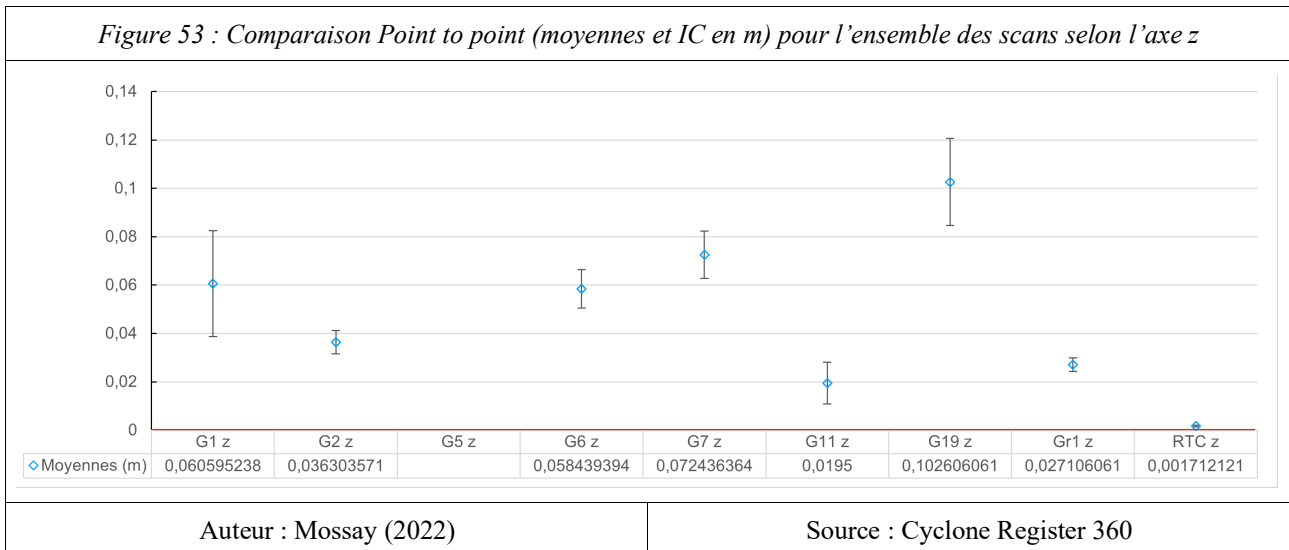
Pour cette comparaison statistique, la méthode point to point est à nouveau utilisée, ce qui permet de donner des résultats plus exacts car les différentes mesures sont comparées aux mesures réalisées à la station totale. Cet instrument fournit, en théorie, les résultats les plus exactes sur l'ensemble des trois machines utilisées (Station totale, TLS et MLS).

Figure 52 : Comparaison Point to point (moyennes et IC en m) pour l'ensemble des scans selon le plan xy



Ce graphique reprend la comparaison des erreurs planimétriques moyennes de l'ensemble des scans, ce qui permet de facilement les comparer entre eux. Même si certains petits scans provenant du MLS obtiennent une assez bonne précision avec des erreurs moyennes situées entre 6,5 et 10 millimètres, les résultats du RTC 360 (TLS) restent largement supérieurs avec une erreur moyenne de 2,9 millimètres.

Figure 53 : Comparaison Point to point (moyennes et IC en m) pour l'ensemble des scans selon l'axe z



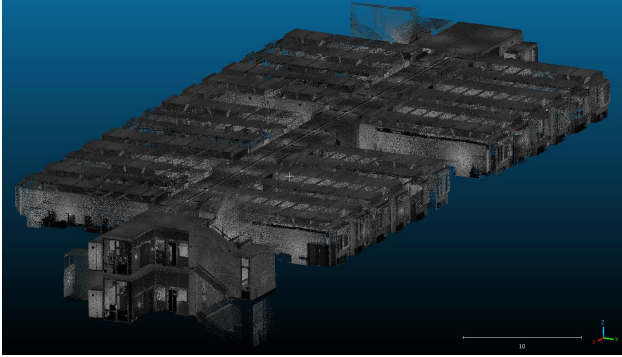
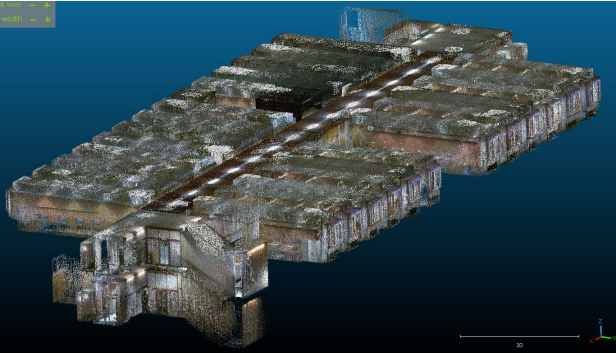
Ce graphique reprend la comparaison des erreurs altimétriques moyennes de l'ensemble des scans. De manière générale, les erreurs altimétriques du MLS sont largement supérieures aux erreurs planimétriques, avec des erreurs moyennes allant de 19,5 à 36,3 millimètres. Au contraire, l'erreur moyenne altimétrique obtenue avec le RTC 360 est de 1,7 millimètres, ce qui est presque équivalent à la moitié de l'erreur planimétrique.

L'erreur moyenne du MLS est généralement largement supérieure à celle du TLS, avec des ordres de grandeur millimétriques à centimétriques pour le MLS et des ordres de grandeurs de quelques

millimètres pour le TLS. De plus, il existe une grande différence de précision entre les mesures planimétriques et altimétriques. En conclusion, cette comparaison valide le choix d'utiliser le nuage du TLS comme référence pour l'analyse cloud to mesh.

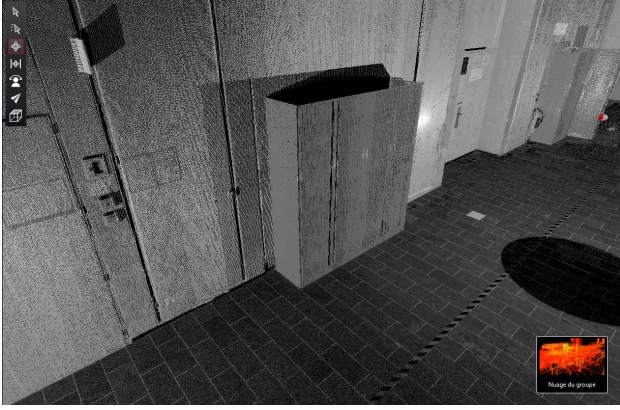

5.4.1.2 Comparaison visuelle

5.4.1.2.1 Scan global

<p><i>Figure 54 : Nuage de points du RTC 360 (TLS)</i></p>	<p><i>Figure 55 : Nuage de points G19 du BLK2GO (MLS)</i></p>
	
<p>Auteur : Mossay (2022)</p>	<p>Source : Cyclone Register 360</p>

Ces captures d'écran montrent des scans globaux des deux couloirs et des laboratoires, à gauche celui du RTC et à droite celui du BLK2GO. Le premier détail perçu est la différence de couleur entre les deux. Ceci s'explique très simplement par le fait que le scan avec le RTC a été réalisé sans coloration pour accélérer la prise de mesure et réduire la taille des fichiers sortants. Mais la couleur n'a aucun impact sur la qualité du nuage de points. À cette échelle globale, aucune différence majeure n'est remarquable.


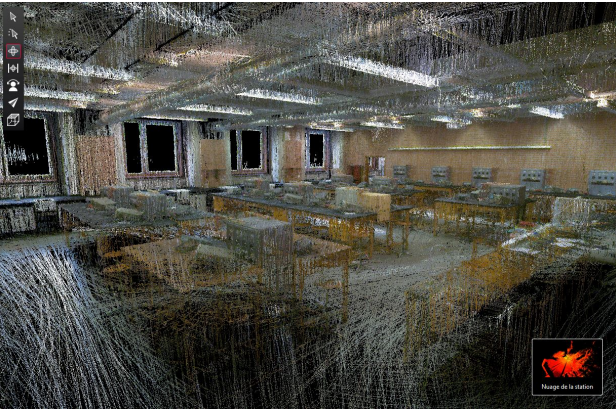
5.4.1.2.2 Géométries simples

<p><i>Figure 56 : Nuage de points du RTC 360 (TLS)</i></p>	<p><i>Figure 57 : Nuage de points G2 du BLK2GO (MLS)</i></p>
	
<p>Auteur : Mossay (2022)</p>	<p>Source : Cyclone Register 360</p>

Sur ces captures d'écran d'un petit échantillon intérieur, celle de gauche correspondant au nuage de points du RTC et celle de droite au BLK2GO, une forte différence est observée. Dans ce cas, il s'agit de géométries assez simples qui sont facilement reconnaissables sur les deux scans.

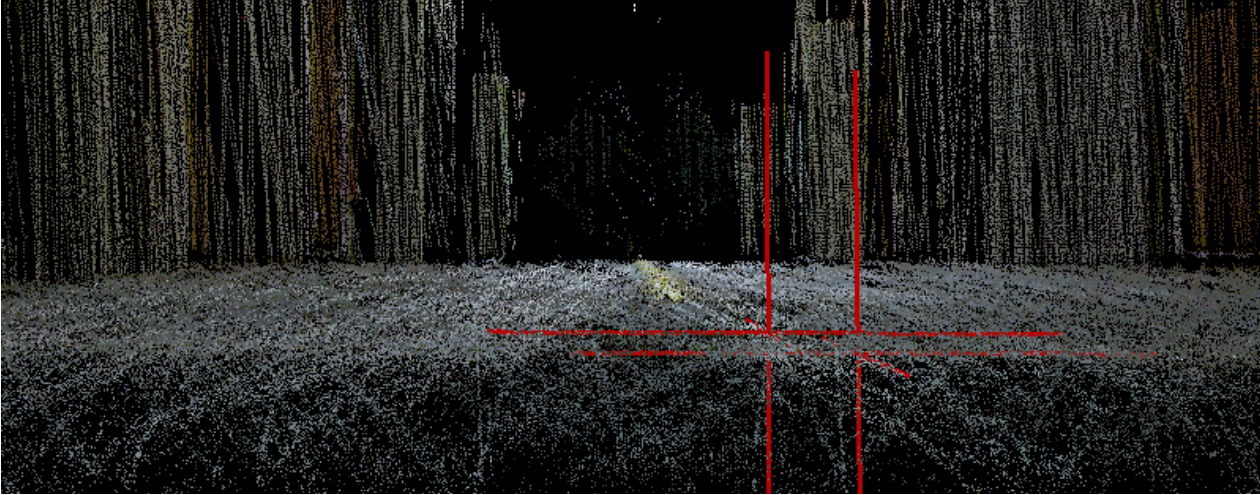
- Le nuage du RTC comprend une bonne densité uniforme montrant beaucoup de détails. Quelques points remarquables sont les taches 'd'ombres' et le cercle noir sur la droite de l'image. Ces taches peuvent en quelque sorte être assimilées à de l'ombre. Comme ce nuage de points a été relevé depuis plusieurs stations, ces taches montrent des parties qui n'étaient pas visibles depuis l'ensemble des stations. C'est donc la somme des points des différents scans réalisées qui fournit ce résultat dense. De plus, le dessus de l'armoire n'est pas perçu car il est plus haut que la position du laserscan. Le cercle noir indique la position du laserscan. Comme celui est placé sur un trépied, il en résulte un cône non-mesuré. Le cercle noir découle donc de l'angle de vision de 300° du RTC 360.
- Pour le nuage du BLK2GO, il faut préciser qu'il s'agit d'un extrait du scan G2 qui est un des scans les plus précis avec un déplacement plus lent et donc une densité de points plus élevée. Le nuage reste, cependant, nettement moins dense et semble être formé par une série de lignes. Ce qui montre le fonctionnement par balayage des capteurs lidars de la machine lors de la prise de mesure. De nombreux détails ne sont pas visibles mais globalement les structures principales sont facilement détectables. Néanmoins, il peut être remarqué que pour la partie gauche de l'image, où le champ de vision est plus perpendiculaire au nuage de points, ce dernier manque fortement de densité.

5.4.1.2.3 Géométries fines

<p><i>Figure 58 : Nuage de points du RTC 360 (TLS)</i></p>	<p><i>Figure 59 : Nuage de points G16 du BLK2GO (MLS)</i></p>
	
<p>Auteur : Mossay (2022)</p>	<p>Source : Cyclone Register 360</p>

Ces illustrations représentent un des laboratoires du premier étage. Sur les nuages de points du RTC (à gauche), certaines zones moins précises à cause d’une plus faible densité sont observables mais dans l’ensemble le résultat semble très bon. Sur le nuage de BLK2GO (à droite), il y a une grosse perte de données pour les géométries plus fines, par exemple, pour les pieds des tables. C’est sur ce type d’images, avec beaucoup de détails et des géométries fines, que la différence de rendu visuel est la plus marquée entre les deux scans.

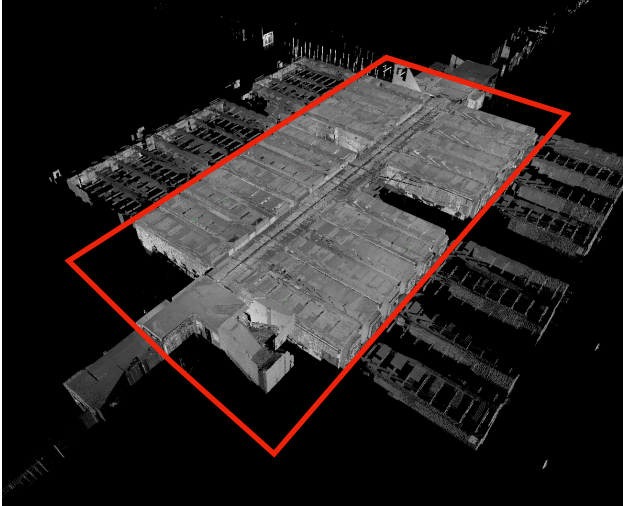
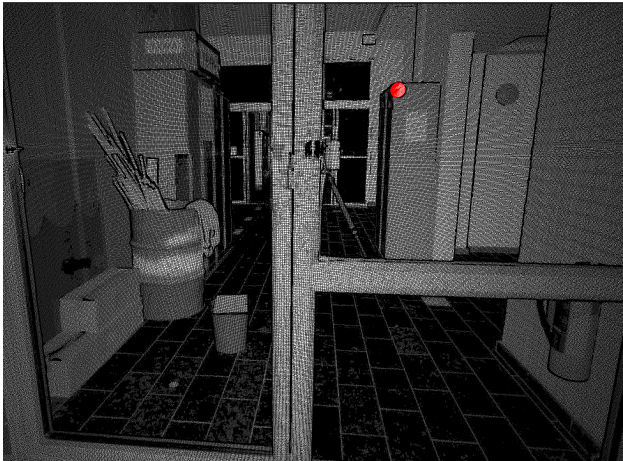
5.4.1.2.4 Cibles à damier

<p><i>Figure 60 : Nuage de points du BLK2GO (MLS)</i></p>	
	
<p>Auteur : Mossay (2022)</p>	<p>Source : Cyclone Register 360</p>

Cet exemple (Figure 60) montre un des problèmes survenus pour l’ensemble des nuages du BLK2GO, les cibles à damier utilisées n’ont pas pu être reconnues par le logiciel Cyclone Register 360. La figure 60 indique à quel point il est difficile de repérer les cibles pour les nuages du BLK2GO mais il faut

préciser que dans ce cas la capture d'écran a légèrement altéré l'image. La cible se trouve en réalité à proximité de la croix rouge à gauche. Normalement, le logiciel Register 360 est capable de repérer lui-même des cibles autour d'un point sélectionné par l'opérateur mais l'exemple ci-dessus montre que ce n'est pas si évident surtout lorsque la même opération est réalisée deux fois d'affilée car cela donne des résultats très différents. C'est pour cette raison que les cibles à damier n'ont pas été utilisées dans la suite des opérations car elles apportent un trop grand risque d'erreurs. Néanmoins, ce choix engendre d'autres problèmes car cela réduit fortement le nombre de cibles communes entre les différents scans et, ainsi, cela diminue le nombre de points à comparer et le nombre de points de référence pour géoréférencier les nuages de points.

5.4.1.2.5 Ghost walls

<i>Figure 61 : Ghost walls du RTC 360 (TLS)</i>	<i>Figure 62 : Ghost walls du RTC 360 (TLS)</i>
	
Auteur : Mossay (2022)	Source : Cyclone Register 360

Un phénomène observé sur tous les nuages de points, que ce soit du RTC 360 ou du BLK2GO, est le phénomène des “ghost walls“ ou murs fantômes qui sont des projections erronées causées par la présence de surfaces réfléchissantes ou transparentes. La réflexion et la réfraction de ces types de surface peuvent dévier les faisceaux laser du lidar et enregistrer des valeurs erronées dans les laserscans. Sur l'illustration de gauche, tous les points en dehors du cadre rouge représentent des géométries qui n'existent pas à ces endroits. Dans ce cas, le phénomène est certainement la conséquence de la présence de vitres car tous ces murs fantômes se trouvent de l'autre côté de ces vitres. L'image de droite indique la vue de l'intérieur du nuage de points à travers une vitre. De ce point de vue, il semble que le couloir continue dans cette direction sans afficher de grosses distorsions flagrantes. En effet, la vitre a fonctionné comme un miroir dans ce cas-ci.

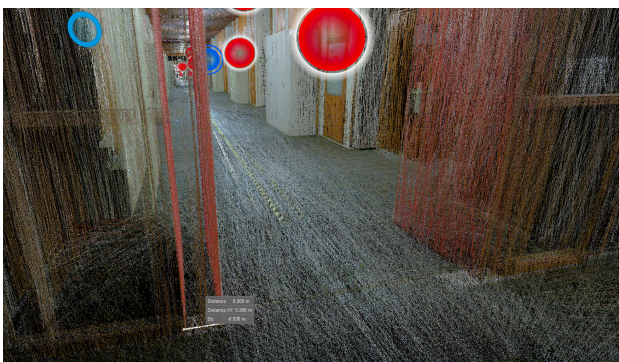
Le problème de la présence de “ghost walls“ n’est, cependant pas, ces parties externes au nuage de points qui peuvent facilement être supprimées lors du nettoyage des nuages de points. Le vrai problème réside dans le fait que certaines de ces surfaces peuvent aussi se créer à l’intérieur du nuage de points où le nettoyage est souvent complexe et donc elles sont souvent impossibles à supprimer sans conséquence. De plus le nettoyage s’effectue manuellement dans l’interface 3D et nécessite beaucoup de temps et une grande minutie. Cette étape est essentielle pour représenter uniquement les géométries qui nous intéressent.

5.4.1.2.6 Décalage des murs et des cibles

Figure 63 : Coupe BLK2GO - G7 - côté ouest

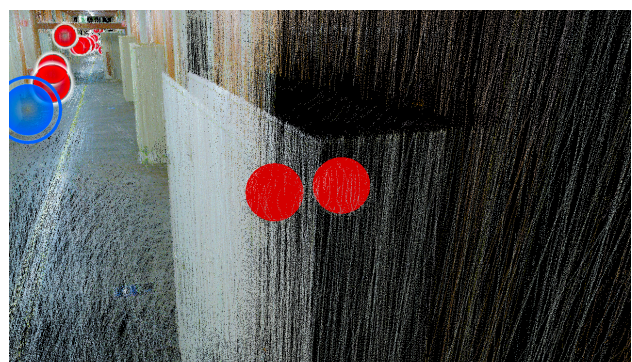


Figure 64 : Décalage BLK2GO - G6



Auteur : Mossay (2022)

Figure 65 : Décalage des cibles BLK2GO - G6



Source : Cyclone Register 360

Sur la première illustration (Figure 63), la coupe du scan G7, un décalage est observable sur la partie ouest du nuage de points, ce décalage est maximal à l’ouest et diminue vers l’est. Pour les scans G6 et G7 du BLK2GO, une boucle entière a été réalisée en démarrant dans la partie ouest du rez-de-chaussée, en traversant le couloir vers l’est et en montant au premier étage. Ensuite, le couloir du premier étage est traversé d’est en ouest pour redescendre au point de départ avec le petit couloir numérisé en double (Annexe 5). C’est donc ce double passage qui explique ce décalage observé à cet endroit. Ce décalage est causé par le fait que le BLK2GO n’est pas doté d’un SLAM capable de faire

des boucles et donc de recorriger le nuage de points directement. Le résultat est donc un seul nuage, comprenant deux fois une même géométrie décalée de quelques centimètres. Pour observer ce décalage plus précisément, certaines distances ont été mesurées à l'aide de l'outil de mesure du logiciel Cyclone Register 360 et indiquent des erreurs de fermeture d'une trentaine de centimètres à l'extrémité ouest et d'une vingtaine de centimètres un peu plus vers l'est. En effet, le décalage n'est observable que dans la partie ouest car seule, cette partie a été mesurée en double et que la distance de visée du BLK2GO n'est que de 25 mètres.

Une autre observation intéressante constatée en déplaçant la coupe sur la hauteur du bâtiment est que la partie du nuage au nord est celle du premier passage mais c'est la partie sud qui semble être la mieux alignée avec la coupe du premier étage. Cette observation peut être due à une erreur de manipulation de l'utilisateur qui s'est produite au passage du rez-de-chaussée et du premier étage ou à une propagation d'erreurs qui s'accroît fortement avec la distance. Étant donné que ce même décalage a été observé pour toutes les boucles effectuées dans le B5b (G6, G7 et G19), l'hypothèse d'une propagation d'erreurs semble plus probable qu'une erreur grossière de l'opérateur lors du scan.

Les deux images en-dessous (Figures 64 et 65) montrent l'effet de ce décalage sur les géométries et les cibles à l'intérieur du scan. Une analyse visuelle du nuage de points permet en général de déterminer quel est le nuage de points du premier passage. Par exemple, sur ce type de géométries qui a été numérisé par l'avant et par l'arrière lors du premier passage, mais uniquement par l'avant lors du deuxième passage, il est possible de voir si des points se trouvent entre les deux surfaces décalées sur l'arrière de la géométrie. Si c'est le cas, le nuage qui ressort le plus est le nuage du premier passage. Si ce n'est pas le cas, ce nuage est celui du deuxième passage. Dans le cas des boucles réalisées lors de ce travail, le nuage nord était à chaque fois le nuage du premier passage et le nuage sud est le mieux aligné avec l'étage du dessus. Pour le géoréférencement et l'analyse par point to point, seules les cibles du nuage du premier passage ont été utilisées.

Étant donné que les trois boucles réalisées présentent le même type d'erreur, une erreur systématique de l'appareil est envisageable. Néanmoins, étant donné que les boucles ont toutes été réalisées selon le même schéma de tracé, il se peut également que cette erreur soit causée par l'environnement du site de relevé. Cette hypothèse est appuyée par le test suivant.

5.4.2 Comparaison entre nuage de points du TLS et le meilleur du MLS

Dans cette dernière comparaison, le nuage de points du TLS et le meilleur nuage de points du MLS, déterminé selon les critères discutés lors des analyses précédentes, sont analysés. Dans ce cas, il s'agit du groupe Gr.4, qui n'est pas le scan le plus précis mais il reprend l'ensemble du bâtiment mesuré avec la technique de mesure et d'assemblage qui conviendrait le mieux au domaine de la construction.

5.4.2.1 Comparaison qualitative

Les scans constituant le groupe ont été relevés avec une vitesse d'avancement assez faible et la densité de points est donc plutôt bonne pour un nuage de points du BLK2GO, mais n'est largement pas aussi bon que le nuage du TLS. La comparaison visuelle précédente a montré de fortes différences de densité ce qui rend la détection de certaines petites géométries assez difficile.

5.4.2.2 Comparaison quantitative

5.4.2.2.1 Point to point

L'analyse point to point pour le groupe Gr.4 est identique à celle du groupe Gr.1 car les deux reprennent les mêmes nuages de points. Les différentes analyses précédentes et le tableau de la figure 52 et 53 indiquent une erreur moyenne de 10,3 millimètres en planimétrie et de 27 millimètres en altimétrie. Les valeurs respectives du nuage du TLS sont de 2,96 et 1,7 millimètres. À partir de ces erreurs moyennes, il est possible d'observer que le nuage issu du MLS est trois fois moins précis en planimétrie et quinze fois moins en altimétrie.

5.5 Synthèse

La différence entre les deux appareils reste très importante, même si des techniques qui permettent d'améliorer le résultat sont appliquées. De plus, les erreurs moyennes du MLS sont supérieures au centimètre et ne sont donc pas utilisables dans le domaine de la construction. En planimétrie, le résultat est proche du centimètre et il serait possible de l'améliorer légèrement pour passer sous le seuil de tolérance. Par exemple, une méthode qui pourrait éventuellement améliorer le résultat serait de réduire encore la vitesse d'avancement et de faire de plus petits scans avec beaucoup de zones de superposition afin de permettre un bon assemblage. Cependant, l'erreur d'élévation est largement supérieure et il est peu probable que la technique proposée permette de réduire suffisamment cette erreur. Il est difficile d'expliquer cette erreur car elle peut éventuellement provenir de l'angle de vision à la verticale qui n'est que de 270°, pour le BLK2GO. L'environnement joue certainement également un grand rôle dans ce résultat. De manière générale, les observations et les analyses

statistiques ont démontré que les résultats du BLK2GO présentent des erreurs nettement plus importantes et plus variables que ceux du RTC 360.

Tableau 16 : Récapitulatif de la comparaison Point to point

Paramètres	Effet sur la précision du nuage de points
Longueur du tracé	--
Vitesse d'avancement	--
Groupe ment par nuages de points	++

La comparaison point to point a mis en évidence certains aspects qui jouent sur la précision des nuages de points du BLK2GO, par exemple, la longueur et la complexité de la trajectoire influencent fortement le résultat final. Néanmoins, de manière générale, la formation de boucles par petits segments de nuages de points permet d'améliorer le résultat par rapport à un scan unique équivalent. Ce constat suggère que l'accumulation d'erreurs qui se fait lors du regroupement des segments de nuages de points par "cloud to cloud" est inférieure à la propagation d'erreur qui se fait sur la distance d'un scan.

Un autre aspect très intéressant est que les différentes erreurs sont plus marquées pour les mesures de hauteur. Une explication de ce phénomène pourrait être qu'en général, les sols et les plafonds sont uniformes et sans relief particulier, ces caractéristiques pourraient éventuellement induire une erreur lors du tracé du SLAM. De plus, le champ de vision du BLK2GO de 270° à la verticale, par rapport aux 360° à l'horizontale, peut aussi participer à l'explication de ce constat.

Tableau 17 : Récapitulatif de la comparaison cloud to mesh

Paramètres	Effet sur la précision du nuage de points
Longueur du tracé	-
Vitesse d'avancement	-
Groupe ment par nuages de points	+

Par rapport à l'analyse point to point, l'influence de la longueur de la trajectoire est moins marquée. Le scan avec la plus grande distance (G19) obtient aussi la plus grande erreur moyenne mais certains scans plus courts (G1 et G2) présentent une erreur moyenne plus importante que d'autres plus longs (G6 et G7). Cependant, cette différence peut éventuellement s'expliquer par le fait que les scans plus courts ont été alignés au mesh de référence uniquement à l'aide des cibles du rez-de-chaussée, qui sont alignées si l'ampleur du scan est considérée. Les scans plus grands ont, quant à eux, été alignés

sur la base de toutes les cibles. La mauvaise répartition des cibles peut donc être responsable de cette erreur plus marquée sur des scans plus courts. De plus, cette hypothèse expliquerait pourquoi cette erreur se remarque seulement avec l'analyse cloud to mesh et non avec l'analyse point to point, en effet, les points de référence ne sont pas forcément erronés entre eux.

Il est pertinent de penser que la longueur influence tout de même la précision et que le regroupement des nuages de points permette d'améliorer ou en tout cas de ne pas empirer le résultat. Il est, cependant, important lors de ce regroupement de posséder un recouvrement suffisamment important entre les différents nuages de points. En effet, dans le cas contraire, l'erreur causée par le regroupement des nuages peut induire des erreurs plus importantes, comme cela est constaté pour le groupe Gr.3. En résumé, le fait de subdiviser un scan en plusieurs sous-nuages de points et de créer des boucles permet généralement d'améliorer le résultat ou de stabiliser les erreurs.

Chapitre 6. Analyses de la 2^{ème} campagne de mesure

Une seconde campagne de mesure a été réalisée dans le but de premièrement valider les résultats obtenus lors de la première campagne de mesure. Cette validation permet de vérifier que la meilleure technique déterminée lors des analyses effectuées ci-avant correspond à la technique optimale et que le résultat obtenu n'est pas uniquement dû au hasard. Deuxièmement, la seconde campagne de mesure a pour objectif de réaliser de nouveaux essais avec le BLK2GO qui a évolué entre les deux campagnes.

6.1.1 Site de mesure

Pour réitérer les mesures, le même site du B5b a été utilisé afin de faciliter le travail de prise de mesure. Les points d'arpentages utilisés pour le relevé à la station totale n'ont pas bougé et un relevé au TLS (RTC 360) a déjà été réalisé au préalable. De telle manière, en se réimplantant dans le système de référence local avec la station totale sur la base des différents points d'arpentages, il est possible de mesurer de nouvelles cibles qui serviront au recalage des nouvelles mesures dans le système local. Cette méthode permet donc de gagner du temps en ne réalisant pas un nouveau cheminement à la station totale et un nouveau relevé au RTC 360. De plus, les nouveaux résultats pourront être directement comparés avec les anciens.

6.1.2 Contrainte horaire

La société Leica a généreusement accepté de fournir une seconde fois le laserscan mobile BLK2GO pour une seconde campagne de mesure. L'appareil a été mis à disposition pour une avant-midi, le 26 juillet 2022. Étant donné le temps limité avec l'appareil, il était logique de retourner sur le même site d'analyse afin de gagner le plus de temps possible pour effectuer les mesures avec le BLK2GO.

6.1.3 Évolutions de l'appareil

Entre la première prise de mesure début avril et la seconde fin juillet, l'appareil a évolué et subi quelques modifications. L'appareil et son software sont désormais capables de faire des boucles. Maintenant, l'appareil détecte automatiquement s'il repasse dans un endroit par lequel il est déjà passé précédemment et compense automatiquement d'éventuelles erreurs (Sabau A.-S., 2022). D'après Maboudi (2018), le fait de réaliser des boucles avec un tel appareil permet de considérablement augmenter la précision du nuage de points final. De plus, l'auteur suggère de

réaliser plusieurs boucles car le fait de réaliser plusieurs passages aux mêmes endroits permet au système de mieux se recalibrer et d'améliorer la précision du nuage de points (Maboudi *et al.*, 2018).

Lors de la première prise de mesure, les résultats d'une boucle complète du bâtiment en un seul scan présentaient une importante erreur de fermeture. Avec cette nouvelle amélioration, le résultat d'une boucle complète peut donc fortement être impacté.

D'autres évolutions mineures permettent de faire des photographies panoramiques ou de choisir entre trois résolutions différentes : forte, moyenne ou basse. La forte densité est celle de base et les deux autres plus faibles densités permettent de créer des fichiers moins volumineux, ce qui ne présente pas d'intérêt dans le cadre de ce travail (Leica Geosystems AG, 2022).

6.1.4 Méthode utilisée

La méthode qui semble fournir les meilleurs résultats pour le nuage de points final est la méthode de l'assemblage de nuages de points en respectant certains critères de prise de mesure d'après les analyses de ce mémoire. Mais étant donné que le laserscan a évolué depuis la première campagne de prise de mesure et est désormais capable de réaliser des boucles, un scan complet des deux couloirs a donc été réalisé, afin d'analyser l'impact des boucles sur le nuage de points final.

6.1.4.1 Assemblage de nuages de points

Cette méthode a donc été choisie suivant les résultats des analyses. Afin d'obtenir le meilleur résultat possible, la prise de mesure a été réalisée selon certains critères :

1. Vitesse d'avancement faible

Afin d'avoir la meilleure précision possible, la prise de mesure a été effectuée avec une vitesse d'avancement réduite, ce qui permet, conformément aux analyses réalisées après la première campagne de prise de mesure, d'améliorer la précision du nuage de points.

2. Longueur des scans restreinte

Pour correspondre aux résultats des analyses des premières mesures, des petits tronçons ont été réalisés pour limiter une éventuelle propagation d'erreurs.

3. Suffisamment de points communs entre les différents nuages de points

Afin de faciliter l'assemblage des différents nuages de points entre eux, suffisamment de superpositions entre les différents nuages de points ont été conservées. De telle manière, le recalage peut se faire avec plus de précision.

4. Plus de cibles et meilleure répartition dans l'espace

Lors de la première prise de mesure, certains scans n'avaient pas pu être utilisés car ils ne possédaient pas suffisamment de points communs ou de cibles ou qu'elles étaient mal réparties dans l'espace. Pour éviter ces problèmes, plus de cibles ont été placées afin d'augmenter le nombre de points communs précis. De plus, les cibles ont été mieux réparties dans l'espace à différentes hauteurs. Néanmoins, à cause de la position des stations et de la station totale aux extrémités des couloirs, toutes les cibles étaient regroupées dans les couloirs afin qu'elles puissent être relevées et pour leur attribuer des coordonnées dans le système local.

6.1.4.2 Boucle simple

Au vu des évolutions de l'appareil en permettant notamment de réaliser des boucles, un tour simple des deux couloirs et des deux cages d'escalier a été effectué, qui peut être comparé aux scans G6 et G7 et au groupe Gr.1 de la première campagne de mesure et au groupe Gr.5 de la seconde campagne de mesure. Le but de ce nouvel essai est d'étudier si cette évolution amène une amélioration au nuage de points final et par la même occasion de vérifier si la méthode déterminée lors de ce mémoire reste la meilleure stratégie de relevé.

6.1.5 Prise de mesure

Les mesures ont été réalisées en suivant la méthodologie de la première campagne de mesure afin de conserver les mêmes conditions de travail et ainsi pouvoir comparer les résultats des deux campagnes sans risquer d'intégrer d'autres facteurs pouvant jouer sur la précision finale.

Tableau 18 : Ensemble des scans réalisés lors de la deuxième campagne de prise de mesure

Nom du scan	Nombre de points	Temps de mesure (min)	Longueur de la trajectoire (m)	Vitesse (m/s)	Description
S1	112 084 291	8,2	133,021	0,27	Rez-de-chaussée
S2	68 589 894	5,4	70,332	0,22	Cage d'escalier ouest
S3	63 096 129	4,5	74,520	0,28	Cage d'escalier est
S5	98 037 160	7,2	117,917	0,27	Premier étage
S6	111 975 684	8,4	138,771	0,27	Laboratoires partie a
S7	80 597 801	6,2	102,271	0,27	Laboratoires partie b
S8	78 056 609	6,0	100,674	0,28	Laboratoires partie c
S9	97 117 877	7,5	110,590	0,25	Laboratoires partie d
S10	170 877 896	12,4	258,834	0,35	Boucle simple des deux couloirs - sans les laboratoires

Dans ce tableau (

Tableau 18), est repris l'ensemble des scans réalisés lors de la prise de mesure. Les scans S1 à S9 comprennent tous une petite partie, destinée à être regroupés en un groupe. Il n'y a pas de scan S4, car il s'agit d'une erreur réalisée sur le terrain. La vitesse d'avancement de ces scans est située entre 0,22 et 0,28 mètre par seconde, ce qui correspond bien à une vitesse d'avancement réduite comme cela a été expérimenté lors de la section dédiée à la vitesse d'avancement. Le scan S10 est un nuage de points reprenant la boucle des deux couloirs avec les deux cages d'escaliers sans les laboratoires.

Tableau 19 : Ensemble des groupes utilisés pour l'analyse des assemblages

Nom du groupe	Nombre de points	Temps de mesure (min)	Nombre de scans utilisés	Constituants	Erreur du groupe (m)
Gr.5	328 817 792	25,3	4	S1 + S2 + S3 + S5	0,008
	Description :	Tour complet des deux couloirs sans les laboratoires			
Gr.6	690 975 940	53,3	8	S1 + S2 + S3 + S5 + S6 + S7 + S8 + S9	0,015
	Description :	Tour complet des deux couloirs et des laboratoires du premier étage			

Le tableau ci-dessus (Tableau 19) reprend les deux groupes réalisés lors de cette deuxième campagne. Le groupe Gr.5 représente le tour simple des deux couloirs et des deux cages d'escaliers, il est donc équivalent aux scans G6 et G7 et au groupe Gr.1 de la première prise de mesure. Le second groupe, Gr.6, correspond au tour complet du bâtiment. Il s'agit en réalité du groupe Gr.5 auquel les laboratoires ont été ajoutés. Le groupe Gr.6 est comparable au scan G19 et aux groupes Gr.3 et Gr.4 de la première campagne de mesure.

6.1.6 Pré-traitements et traitements

Les pré-traitements et traitements réalisés pour ces nuages de points sont identiques à ceux effectués lors de la première campagne de mesure. Ces étapes comprennent le nettoyage des nuages de points ; la sélection des cibles ; le géoréférencement des nuages à l'aide des coordonnées des cibles et la fusion des différents nuages de points entre eux pour former les groupes. Ces différentes étapes sont plus détaillées aux sections correspondantes dans le chapitre "Méthodologie".

6.1.7 Analyses

Cette section a pour but de comparer les différents scans du BLK2GO entre eux afin de vérifier si la méthodologie préconisée fonctionne correctement et si elle fournit effectivement le meilleur résultat possible pour le BLK2GO.

6.1.7.1 Comparaison qualitative

D'un point de vue qualitatif, les nuages de points des deux campagnes de mesures sont fort semblables. Même si l'appareil a évolué, aucune différence visuelle importante n'a été constatée sur les nuages de points dans ce travail. Comme pour les autres nuages de points du BLK2GO (MLS), les nuages de la seconde prise de mesure sont moins denses que ceux du RTC 360 (TLS) et présentent des structures rectilignes qui indiquent le balayage du capteur de la machine.

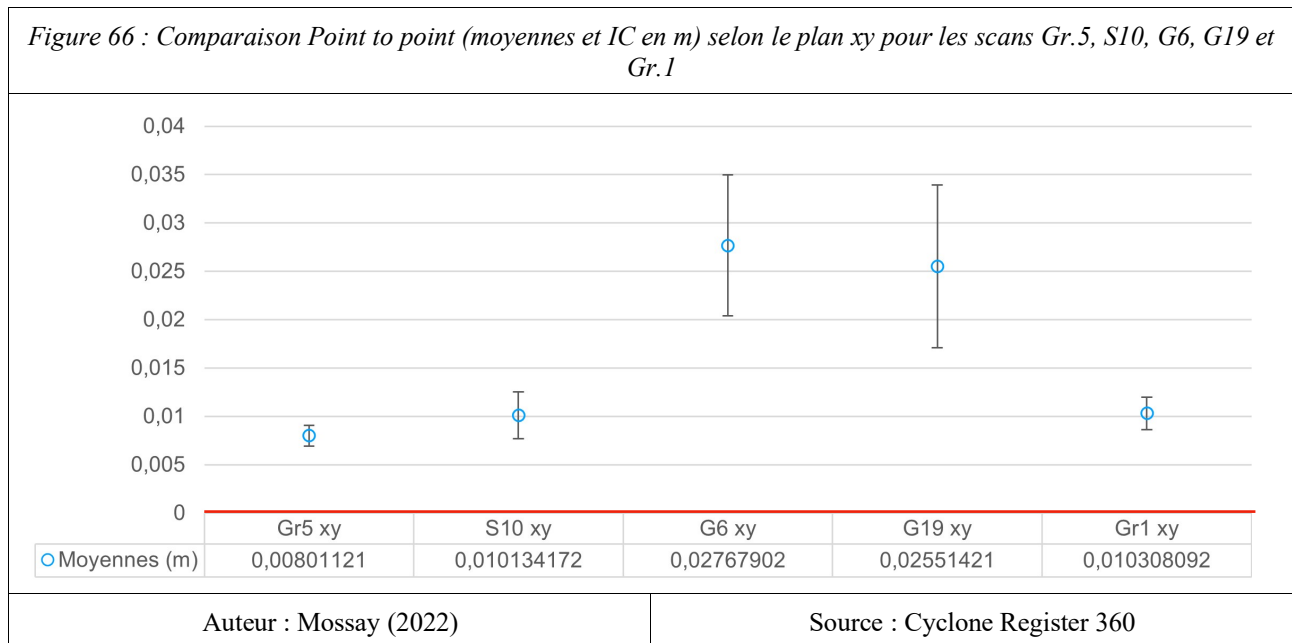
6.1.7.2 Comparaison quantitative

Dans cette section, sont comparés statistiquement les différents scans entre eux. Comme pour les cas précédents, une analyse point to point et une analyse cloud to mesh ont été réalisées. Cependant, lors de l'analyse visuelle du cloud to mesh, une rotation est observable autour de l'axe est-ouest en passant à travers les deux couloirs. Pour éviter ce phénomène, qui avait déjà été observé sur plusieurs scans, les cibles ont été placées selon une meilleure répartition dans l'espace pour la seconde prise de mesure. Cependant, sur l'échelle du scan entier cette répartition des points de contrôle n'est toujours pas idéale, ce qui a pu entraîner ces rotations.

L'analyse cloud to mesh utilise le maillage du RTC 360 (TLS) comme référence. Or, celui-ci est géoréférencé depuis les cibles placées lors de la première journée de terrain qui ne sont plus positionnées aux mêmes endroits lors de la seconde journée. Ainsi, un des deux géoréférencements a certainement mieux fonctionné, ce qui pourrait expliquer pourquoi les nuages de points ne sont pas correctement superposés. Dans ce cas, il s'agit d'une erreur de bonnes pratiques du géomètre, en effet, les cibles ont été mal positionnées lors des deux journées de terrain. Toutes les cibles étaient placées dans les couloirs du bâtiment, qui d'un point de vue de l'ensemble du bâtiment, forment un axe est-ouest rectiligne. Néanmoins, cette erreur s'est également produite à cause de la structure du bâtiment et du cheminement effectué mais il ne s'agit donc pas forcément d'une déformation du nuage de points en lui-même. C'est pour cette raison que seule la comparaison point to point sera réalisée dans cette section.

6.1.7.2.1 Point to point

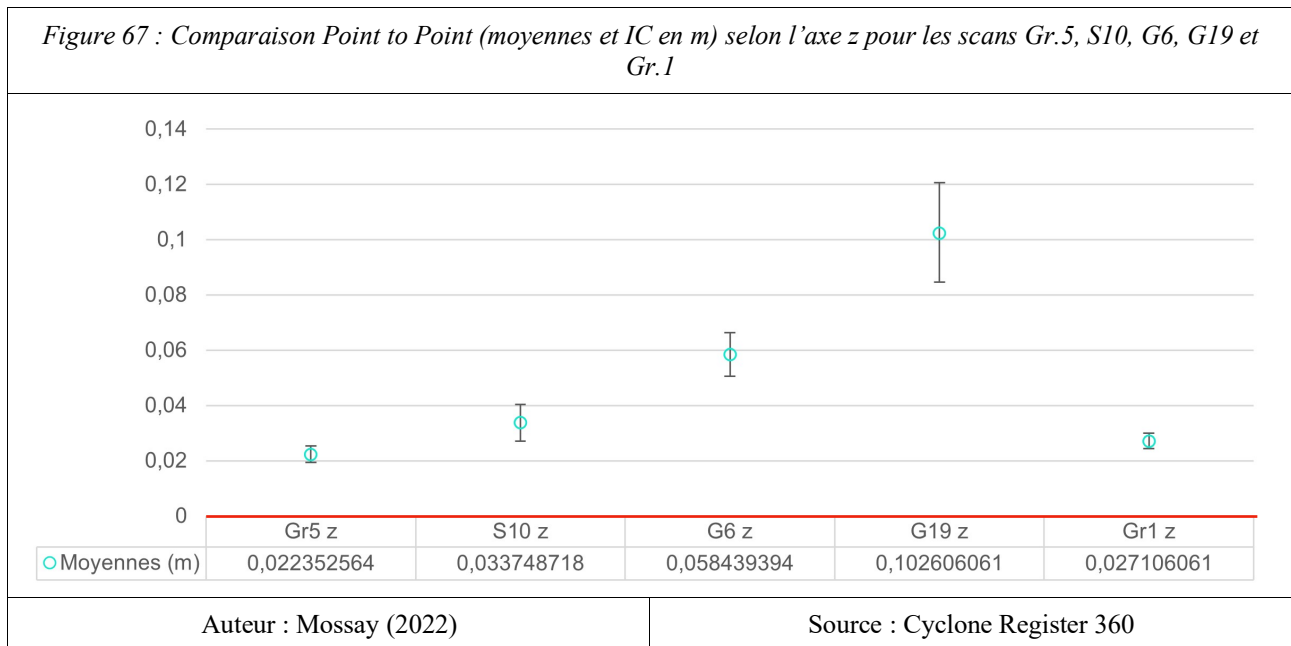
Cette analyse s'effectue à partir des scans G6, G19 et du groupe Gr.1 de la première journée de mesures et des scans S10 et Gr.5, de la deuxième journée. Le groupe Gr.6 n'est pas utilisé dans cette comparaison car les cibles utilisées pour ce test sont toutes situées dans les couloirs du B5b et pour cette partie le groupe Gr.6 est identique au Gr.5.



Ce graphique (Figure 66) montre plusieurs informations très intéressantes. La première est que les valeurs planimétriques obtenues pour le groupe Gr.5 sont comparables à celle du groupe Gr.1. Ils ont tous deux des erreurs moyennes proche du centimètre pour des erreurs moyennes de plus de 2,5 centimètres pour les scans G6 et G19. Ces résultats démontrent donc bien que la technique employée de regrouper des nuages de points en groupes pour créer une boucle est la plus efficace des techniques utilisées. Le fait d'avoir acquis un peu d'expérience a également permis de mieux comprendre comment manipuler l'appareil, ce qui a permis de relever les nuages de telle manière à ce qu'ils puissent facilement être regroupés. C'est certainement grâce à cette meilleure connaissance que l'erreur moyenne planimétrique se situe sous le centimètre pour le groupe Gr.5. Ainsi, ce groupe remplirait la condition fixée (pour rappel, avoir une erreur sous le centimètre) pour que l'appareil puisse être utilisé dans le domaine de la construction.

Un second point très intéressant concerne le scan S10, la boucle construite grâce aux nouvelles évolutions. L'erreur planimétrique est légèrement supérieure à celle du groupe Gr.5 mais correspond globalement à la précision attendue des groupes. En comparaison avec un scan équivalent, le G6, la différence est importante entre des scans réalisés avec le même appareil avant et après l'évolution. L'erreur planimétrique est passée de plus de 2,5 centimètres à approximativement un centimètre.

Selon les conditions fixées arbitrairement, le nuage de points du scan S10 pourrait presque être utilisé tel quel, dans le domaine de la construction.



Sur ce graphique (Figure 67), sont représentées les erreurs moyennes altimétriques des différents scans. L'analyse des scans entre eux est similaire à celle des erreurs planimétriques. Les deux groupes, Gr.5 et Gr.1, présentent une erreur moyenne considérablement inférieure à celle des scans G6 et G19 et le groupe Gr.5 présente une précision légèrement supérieure au groupe Gr.1. De plus, de manière semblable, le scan S10 est plus proche de la précision des groupes que celle du scan équivalent, G6.

La grande différence par rapport aux erreurs planimétriques repose sur les ordres de grandeur, qui était du centimètre pour les groupes et le scan S10 et de plus de 2,5 centimètres pour les scans G6 et G19. Les erreurs altimétriques moyennes sont respectivement entre deux et trois centimètres pour les groupes, un peu supérieure à trois centimètres pour le scan S10, un peu inférieure à six centimètres pour le scan G6 et supérieure à 10 centimètres pour le scan G19. Toutes ces valeurs sont largement supérieures à la tolérance fixée arbitrairement pour ce travail, de maximum un centimètre.

6.1.7.3 Synthèse

Cette validation confirme les résultats obtenus lors de ce travail. En effet, le regroupement de nuages de points pour former de plus grands nuages de points permet d'obtenir une bonne précision. D'un point de vue planimétrique, la précision semble suffisante pour l'utilisation de l'appareil BLK2GO dans le domaine de la construction, cependant, les erreurs planimétriques posent encore un problème

dans tous les cas rencontrés. Cette erreur peut éventuellement être due à l'environnement mais il est difficile d'expliquer son origine réelle.

Étant donné que les résultats obtenus par le groupe Gr.5 ne sont pas nettement plus précis que ceux obtenus par le groupe Gr.1, il est possible d'en déduire que le RTC reste largement plus précis que le BLK2GO. Même si d'un point de vue planimétrique, le résultat du BLK2GO se rapproche légèrement de celui du RTC, les erreurs altimétriques restent trop importantes.

Un point positif à pointer est le résultat obtenu avec le scan S10, qui obtient des valeurs moyennes comparables alors que ce scan est deux fois plus rapide, avec une durée de 12 minutes contre 25 minutes pour le groupe Gr.5. De plus, le scan S10 nécessite moins de pré-traitements car il n'y a qu'un seul nuage à nettoyer. Cette nouvelle évolution du BLK2GO permet donc de s'approcher de la qualité des groupes avec un temps de mesures plus court et une quantité de travail moindre. De plus, certains travaux ont montré qu'en effectuant plusieurs boucles successives il est possible de fortement augmenter la précision du nuage de points final (Maboudi *et al.*, 2018).

Chapitre 7. Conclusion

Ce travail visait la comparaison de deux types d'instruments, le MLS et le TLS, au travers d'une question : *“La précision des MLS actuels est-elle suffisante pour l'utilisation dans le domaine du bâtiment et de la reconstruction 3D par rapport aux instruments actuellement utilisés, les TLS et est-il possible d'améliorer cette précision ?”* L'analyse a été effectuée grâce à de nombreux pré-traitements et traitements et en utilisant deux méthodes de comparaison principales, point to point et cloud to mesh. Ces méthodes ont ensuite été étudiées par une comparaison visuelle et une analyse statistique (moyenne, écart-type et intervalle de confiance) pour fournir une réponse au questionnement principal.

Comme observé dans la littérature au travers de l'état de l'art et selon les résultats obtenus, la qualité du MLS est encore nettement inférieure à celle du TLS. Les résultats montrent qu'à tout point de vue, le TLS fournit de meilleurs résultats que ce soit visuellement ou géométriquement. Cependant, les erreurs du MLS ne semblent pas forcément être des erreurs systématiques de l'appareil, bien que la précision de ses capteurs soit moindre par rapport à ceux du TLS. Néanmoins, les erreurs observées semblent provenir de nombreuses origines différentes et l'exemple du B5a permet de démontrer que le nuage de points final n'est pas forcément entaché d'erreurs majeures. Il semble effectivement que la longueur du scan et l'environnement jouent un rôle primordial dans le rendu final des nuages de points en général et encore plus pour les nuages de points mesurés avec un MLS. Certaines méthodes, comme le regroupement par des nuages de points de plus petite ampleur, permettent, cependant, de réduire ces erreurs ou de les maîtriser sur l'entièreté du scan.

Concernant la tolérance fixée à un centimètre pour que l'appareil soit considéré utilisable dans le domaine de la construction, seul le nuage du TLS remplit largement les attentes avec des erreurs moyennes de l'ordre de quelques millimètres. Les nuages de points du MLS ont tous des erreurs supérieures au centimètre. Seul, le groupe Gr1 et le groupe Gr.5 s'approchent de la tolérance avec un erreur moyenne sur les points de référence proche du centimètre en planimétrie et un peu plus de deux centimètres en altimétrie. Pour le groupe Gr.1, les résultats de l'analyse cloud to mesh montrent des erreurs moyennes en-dessous du centimètre mais ce résultat est en partie causé par le nombre de points très important d'un nuage de points. Il est donc primordial que l'erreur point to point soit également inférieure au centimètre. Cependant, les résultats des groupes Gr.1 et Gr.5 sont de bonne augure et ouvre la porte à d'autres améliorations futures qui permettront aux MLS d'être plus facilement utilisés dans le domaine de la construction.

La deuxième campagne de prise de mesure a permis de confirmer les résultats obtenus. En effet, la création de boucles en regroupant plusieurs nuages de points de plus petite ampleur entre eux permet d'améliorer la précision du nuage de points global. Les évolutions apportées à la machine entre les deux campagnes permettent désormais de réaliser des boucles, qui donnent des résultats très intéressants. Malheureusement, les contraintes horaires ont empêché la réalisation de plusieurs boucles. Il serait, cependant, particulièrement intéressant de répéter les mesures en effectuant plusieurs boucles pour analyser s'il est possible de descendre sous la tolérance d'erreur fixée.

Un autre aspect qui pourrait être analysé dans des travaux futurs est l'utilisation complémentaire d'un TLS et d'un MLS. Le TLS pourrait être utilisé pour numériser un axe principal auquel viendraient se fixer des scans fournis par un MLS. Cette complémentarité permettrait de travailler un peu plus vite et d'accéder plus facilement à certains endroits difficiles d'accès.

En conclusion, les MLS permettent un véritable gain de temps par rapport aux TLS mais la précision des MLS reste encore nettement moindre. Cependant, même si géométriquement le résultat se rapproche de celui du TLS, le résultat visuel beaucoup moins dense du MLS ne permet pas les mêmes applications que le TLS. Ainsi, les MLS n'ont pas encore une précision suffisante pour être utilisé tel quel dans le domaine de la construction. Néanmoins, il faut préciser que certaines méthodes, comme le regroupement de nuages de points et la création de boucles, permettent d'améliorer la précision du MLS, donc ses résultats, et pourraient être développées de manière plus approfondie afin de se rapprocher de la qualité du TLS. La deuxième campagne de prise de mesure a permis de pointer le fait que les MLS sont en perpétuel développement et que des améliorations majeures arrivent régulièrement. Cependant, il reste fort improbable que les MLS remplacent complètement les TLS à l'avenir car leur précision demeurera certainement moindre. Mais avec de tels développements les MLS remplaceront bientôt les TLS dans certains domaines car leur prix est plus abordable et leur maniement plus aisé.

Chapitre 8. Sources

ADAM Technology., (2008). *Laser Scanning vs Digital Photogrammetry Introduction*. ADAM Technology. 1–8. <https://archive.amerisurv.com/PDF/LaserScanningVsPhotogrammetry080108.pdf>. Consulté le 10 mai 2022.

Antova, G. (2019). *Application of Areal Change Detection Methods Using Point Clouds Data*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 221(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/221/1/012082>

Barnes, P., & Davies, N. (2015). *BIM in Principle and in Practice (Second edition)*. ICE Publishing. <https://doi.org/10.1680/bimpp.60920>

Billen, R. (2019). *Introduction à la topographie*. Université de Liège. Notes de cours, inédit.

Billen, R. (2021). *Compléments de topographie (Master 1)*. Université de Liège. Notes de cours, inédit.

Billen, R. (2022). *Compléments de topographie (Master 2)*. Université de Liège. Notes de cours, inédit.

Cadena, C., Carlone, L., Carrillo, H., Latif, Y., Scaramuzza, D., Neira, J., Reid, I., & Leonard, J. J. (2016). *Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: Toward the robust-perception age*. *IEEE Transactions on Robotics*, 32(6), 1309–1332. Consulté le 15 avril 2022. <https://doi.org/10.1109/TRO.2016.2624754>

CloudCompare. (n.d.). *User Manual*, version 2.6.1. CloudCompare. <http://www.cloudcompare.org/doc/qCC/CloudCompare%20v2.6.1%20-%20User%20manual.pdf>. Consulté le 28 avril 2022.

Cunha, R. R., Arrabal, C. T., Dantas, M. M., & Bassaneli, H. R. (2022). *Laser scanner and drone photogrammetry: A statistical comparison between 3-dimensional models and its impacts on outdoor crime scene registration*. *Forensic Science International*, 330. Consulté le 15 février. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2021.111100>

D.G.M., A.B. & R.M. (2017). *CloudCompare : manuel utilisateur de la version 2.4*. DanielGM. https://www.danielgm.net/cc/doc/qCC/Documentation_CloudCompare_version_2_4.pdf. Consulté le 24 avril 2022.

Díaz-Vilariño, L., Frías, E., Balado, J., & González-Jorge, H. (2018). *Scan planning and route optimization for control of execution of as-designed bim*. *International Archives of the*

Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 42(4), 217–224. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-143-2018>

Donnay, J.-P. (2013). *Généralisation cartographique : changements de dimension de points à polygones*. In Donnay J.-P. (ed), *Guide de rédaction des cartes thématiques : méthodes et consignes*. Liège : Unité de Géomatique de l'Université de Liège, 8-9.

Donnay, J.-P. (2018). *Analyse spatiale*. Université de Liège. Notes de cours, inédit.

Durrant-Whyte, H., & Bailey, T. (2006). *Simultaneous localization and mapping: Part I*. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 13(2), 99–108. Consulté le 15 avril 2022. <https://doi.org/10.1109/MRA.2006.1638022>

Google. (2020). Google Earth Online. Google. <https://earth.google.com/web/>. Consulté le 12 mai 2022.

Hübner, P., Weinmann, M., Wursthorn, S., & Hinz, S. (2021). *Automatic voxel-based 3D indoor reconstruction and room partitioning from triangle meshes*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 181, 254–278. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.07.002>

Issa, R. R. A., & Olbina, S. (2015). *Building information modeling: Applications and practices*. In *Building Information Modeling: Applications and Practices*. American Society of Civil Engineers (ASCE). <https://doi.org/10.1061/9780784413982>

Kazhdan, M., & Hoppe, H. (2013). *Screened Poisson surface reconstruction*. *ACM Transactions on Graphics*, 32. <https://www.cs.jhu.edu/~misha/MyPapers/ToG13.pdf>. Consulté le 17 mai 2022.

Kensek K. M. & Noble D. E. (2014). *Building information modeling : BIM in current and future practice*. New Jersey : John Wiley & Sons, Inc, 397 p.

Leica Geosystems AG, (2018). *Leica RTC 360 : solution de capture de la réalité 3D. Rapide, agile, précis*. Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Suisse

Leica Geosystems AG, (2019). *Leica BLK2GO : scanner laser d'imagerie portatif*. Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Suisse.

Leica Geosystems AG, (2022). *Leica BLK2GO & BLK ARC : Handheld imaging laser scanner autonomous reality capture*. Release notes. Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Suisse.

Leica, (2022). *La technologie BLK2GO*. Leica Geosystems. <https://shop.leica-geosystems.com/fr/fr-FR/leica-blk/blk2go/technology>. Consulté le 23 février 2022.

Lehtola, V. V., Kaartinen, H., Nüchter, A., Kaijaluoto, R., Kukko, A., Litkey, P., Honkavaara, E., Rosnell, T., Vaaja, M. T., Virtanen, J. P., Kurkela, M., El Issaoui, A., Zhu, L., Jaakkola, A., & Hyypä, J. (2017). *Comparison of the selected state-of-the-art 3D indoor scanning and point cloud generation methods*. *Remote Sensing*, 9(8). <https://doi.org/10.3390/rs9080796>

Lipecki, T., & Thi Thu Huong, K. (2020). *The development of terrestrial laser scanning technology and its applications in mine shafts in Poland*. *Inzynieria Mineralna*, 1(1), 301–310. Consulté le 10 avril 2022. <https://doi.org/10.29227/IM-2020-02-36>

- Maboudi, M., Bánhidi, D., & Gerke, M. (2017). *Evaluation of indoor mobile mapping systems*. GFaI Workshop 3D North East 2017 (20th Application-Oriented Workshop on Measuring, Modeling, Processing and Analysis of 3D-Data), 125–134. <https://www.tu-braunschweig.de/igp>. Consulté le 20 février 2022.
- Maboudi, M., Bánhidi, D. & Gerke, M. (2018). *Investigation of geometric performance of an indoor mobile mapping system*. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(2), 637–642. Consulté le 3 février 2022. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-637-2018>
- Mathworks, (n.d.). *What is SLAM ? 3 things you need to know*. Mathworks. <https://nl.mathworks.com/discovery/slam.html>. Consulté le 03 mars 2022.
- Mulahusić, A., Tuno, N., Gajski, D., & Topoljak, J. (2020). *Comparison and analysis of results of 3D modelling of complex cultural and historical objects using different types of terrestrial laser scanner*. *Survey Review*, 52(371), 107–114. Consulté le 10 février 2022. <https://doi.org/10.1080/00396265.2018.1528758>
- Nikooohemat, S., Peter, M., Elberink, S. O., & Vosselman, G. (2018). *Semantic interpretation of mobile laser scanner point clouds in Indoor Scenes using trajectories*. *Remote Sensing*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/rs10111754>
- Nys G.-A. (2016). *Développement d'un prototype de prédiction de la précision d'un réseau géodésique*. Mémoire en sciences de l'ingénieur industriel à finalité géomètre, Liège, Haute Ecole de la Province de Liège, inédit, 99 p.
- Piniotis, G., Soile, S., Bourexis, F., Tsakiri, M., & Ioannidis, C. (2020). *EXPERIMENTAL ASSESSMENT of 3D NARROW SPACE MAPPING TECHNOLOGIES*. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 43(B2), 149–156. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-149-2020>
- Poux, F., (2019). *Méthodes d'acquisition de données spatiales*. Université de Liège. Notes de cours, inédit.
- Professional Surveyor Magazine. (2002). *DIN 18723 Specification for Theodolite Accuracy*. Professional Surveyor Magazine, November. <http://s3.microsurvey.com.s3.amazonaws.com/support/Knowledgebase/stderr/Din18723.pdf>, consulté le 8 mai 2022.
- Puente, I., González-Jorge, H., Martínez-Sánchez, J., & Arias, P. (2013). *Review of mobile mapping and surveying technologies*. In *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* (Vol. 46, Issue 7, pp. 2127–2145). Elsevier B.V. Consulté le 10 février 2022. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.03.006>
- Sabau A.-S. (2022). *Explications des systèmes Leica*. Leica Geosystems. Communications personnelles, inédit.
- Sammartano, G., & Spanò, A. (2018). *Point clouds by SLAM-based mobile mapping systems: accuracy and geometric content validation in multisensor survey and stand-alone acquisition*. *Applied Geomatics*, 10(4), 317–339. <https://doi.org/10.1007/s12518-018-0221-7>

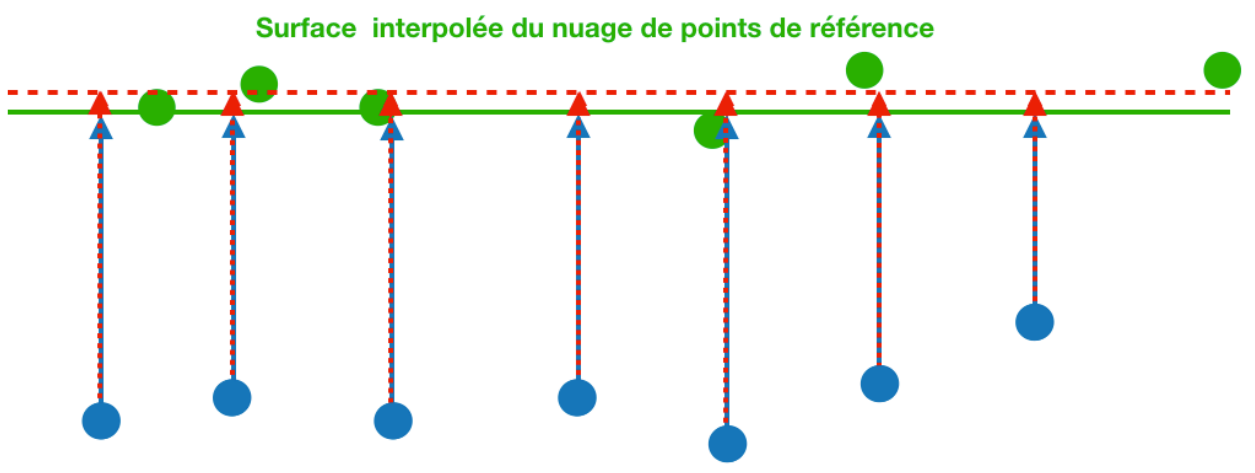
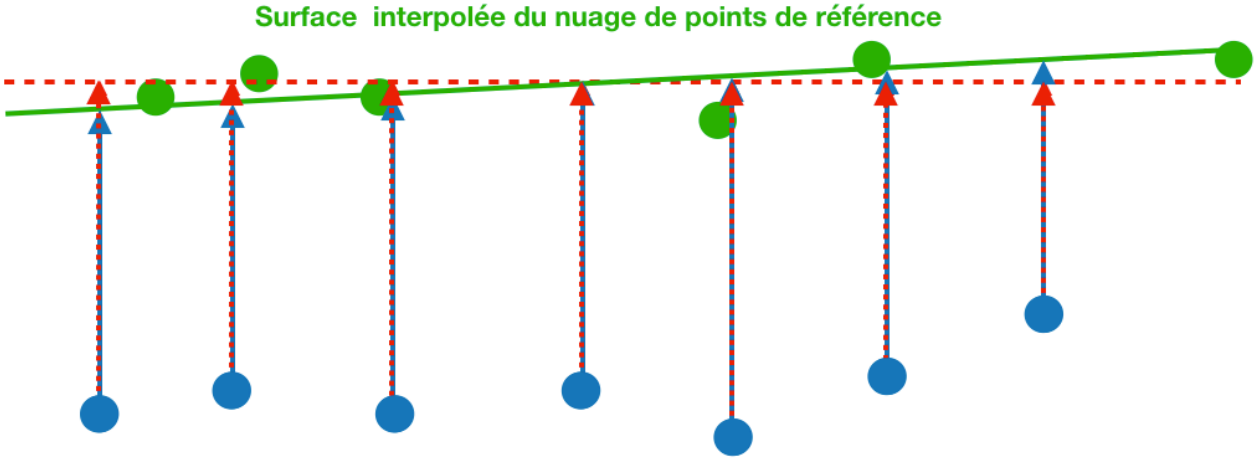
Trimble, (2007 - 2013). *Fiche technique : Station totale Trimble S8*. Trimble Germany GmbH.

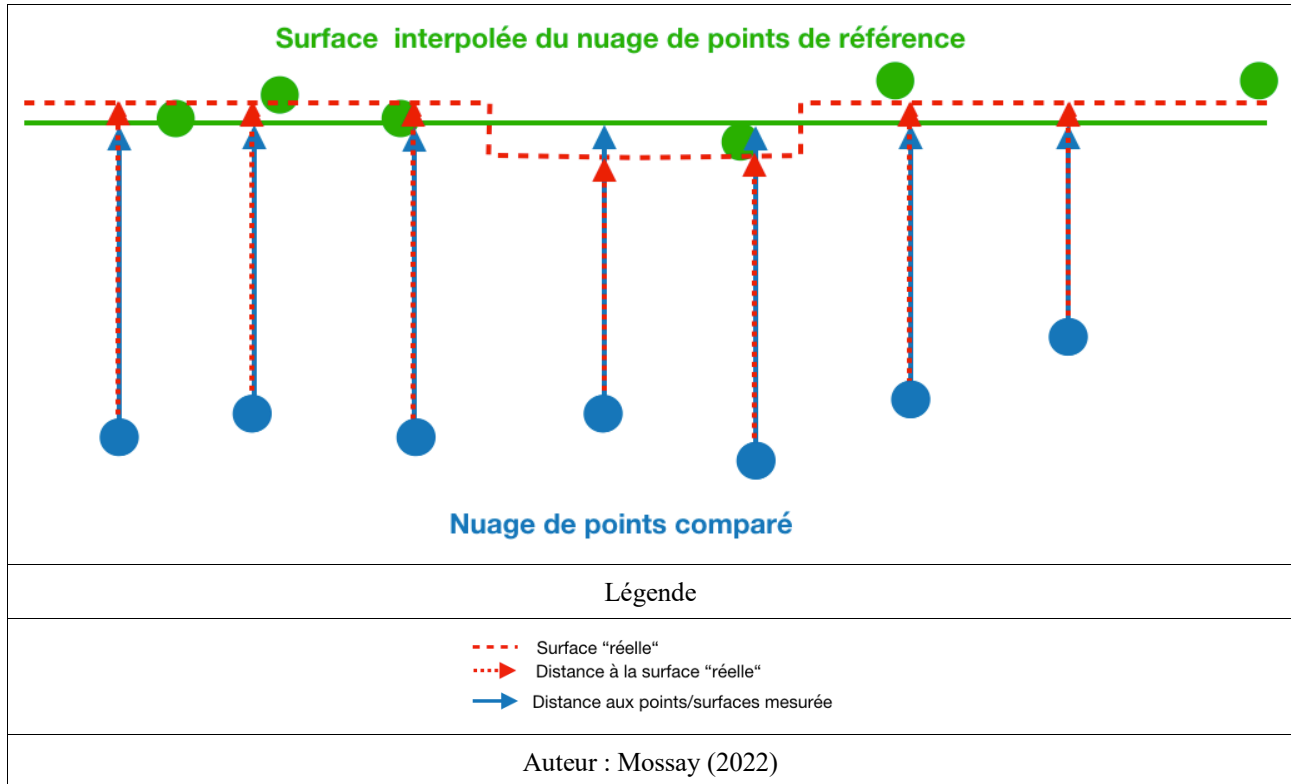
Tucci, G., Visintini, D., Bonora, V., & Parisi, E. I. (2018). *Examination of indoor mobile mapping systems in a diversified internal/external test field*. Applied Sciences (Switzerland), 8(3). <https://doi.org/10.3390/app8030401>

Van Genechten, B., (2022). *Explications des systèmes Leica*. Leica Geosystems. Communications personnelles, inédit.

Warnant, R., (2020). *Théorie des erreurs*. Université de Liège. Notes de cours, inédit.

Chapitre 9. Annexes

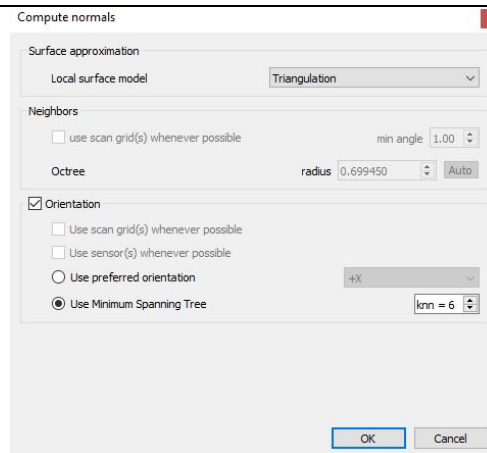
Annexe 1 : Tableau : Cas d'erreurs pour le point to surface
Cloud to surface (cas théorique)
<p>Surface interpolée du nuage de points de référence</p>  <p>Nuage de points comparé</p>
Cloud to surface (cas d'un mauvais alignement)
<p>Surface interpolée du nuage de points de référence</p>  <p>Nuage de points comparé</p>
Cloud to surface (cas de paramètres trop grossiers)



Annexe 2 : Coordonnées obtenues par la station totale				
ID point	X	Y	Z	Type
1000	1000.000	2000.000	100.000	STA
3000	964.486	2022.001	99.198	STA
6000	964.469	2022.000	103.351	STA
6001	850.340	2000.001	98.906	STA
2000	850.339	2000.000	98.912	STA
4000	895.951	2020.981	99.210	STA
100	958.272	2019.468	100.013	SPH
101	951.359	2022.946	101.093	SPH
102	940.498	2020.040	101.057	SPH
103	928.265	2021.868	99.744	SPH
104	917.157	2020.197	99.741	SPH
105	906.134	2021.454	101.022	SPH
106	897.157	2020.466	99.280	SPH
107	961.198	2020.507	99.260	SPH
108	962.131	2020.423	101.067	SPH
200	956.548	2021.654	99.333	DAM
201	949.357	2022.735	100.690	DAM

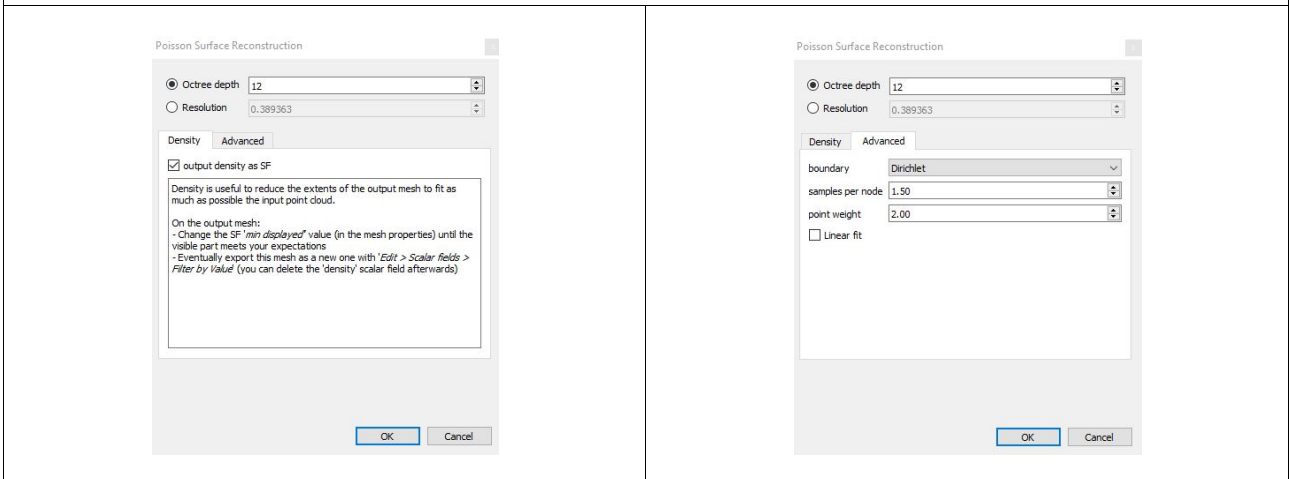
202	934.395	2022.730	101.291	DAM
203	929.634	2020.476	99.327	DAM
204	903.856	2020.730	99.336	DAM
205	903.856	2020.728	99.333	DAM
5000	895.974	2021.048	103.351	STA
109	958.252	2021.681	103.429	SPH
110	940.399	2021.200	103.434	SPH
111	965.058	2022.118	105.024	SPH
112	920.933	2021.241	103.434	SPH
113	898.623	2019.444	103.420	SPH
206	903.797	2020.010	103.495	DAM
207	923.155	2020.218	103.492	DAM
208	937.891	2021.767	103.494	DAM
209	956.629	2020.991	103.491	DAM

Annexe 3 : Paramètres du calcul des normales RTC 360



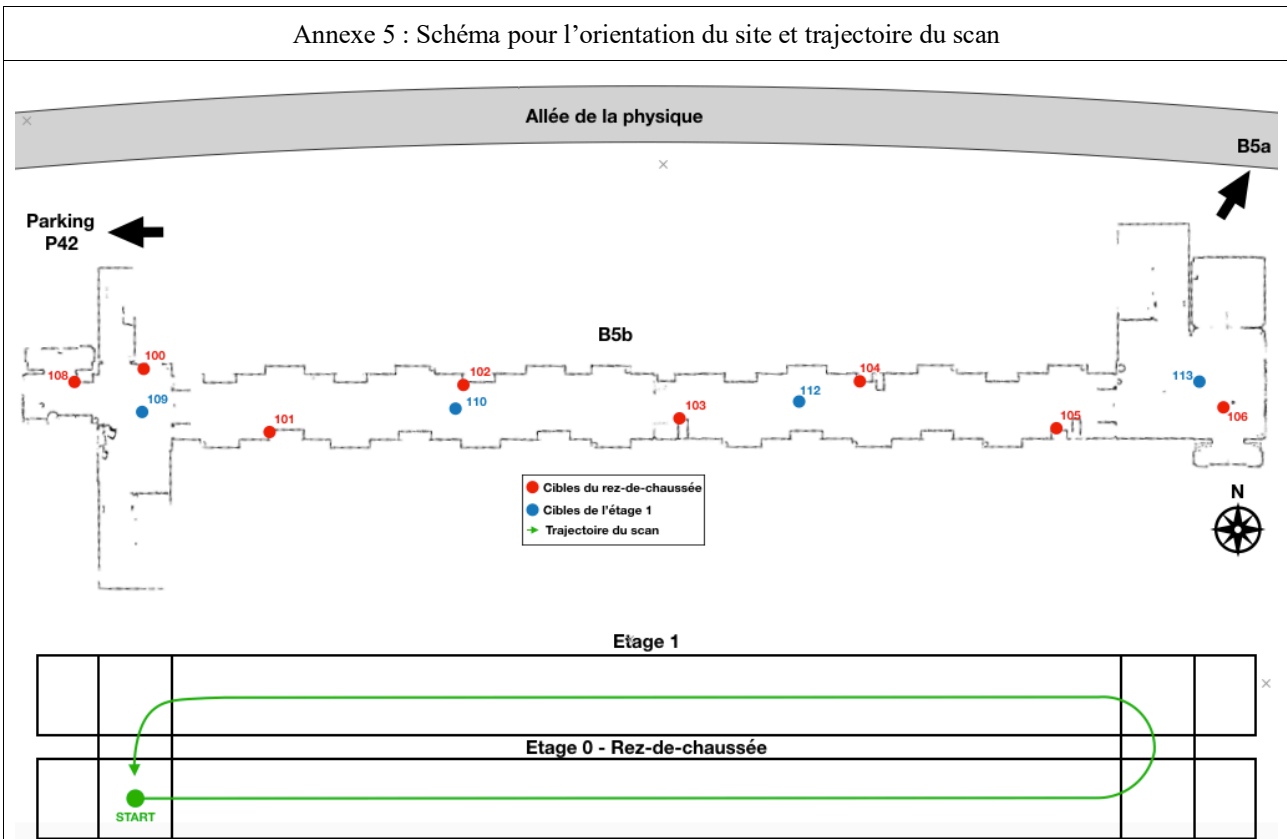
Source : Capture d'écran CloudCompare™

Annexe 4 : Paramètres du calcul du mesh



Source : Capture d'écran CloudCompare™

Annexe 5 : Schéma pour l'orientation du site et trajectoire du scan



Auteur : Mossay (2022)

Source : Cyclone Register 360

Annexe 6 : Gr1 - 10cm - coupe est



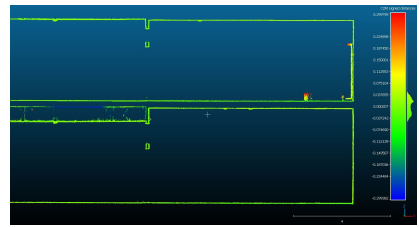
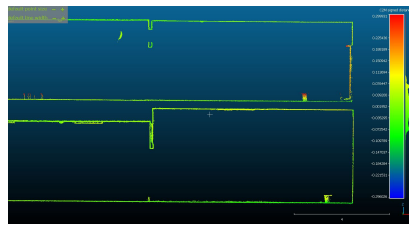
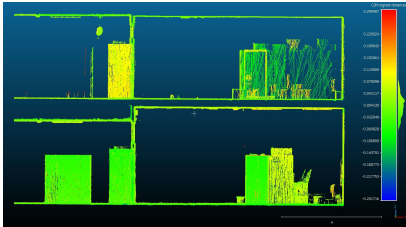
Source : Capture d'écran CloudCompare™

Annexe 7 : Coupe nord

G6 - coupe nord (côté ouest)

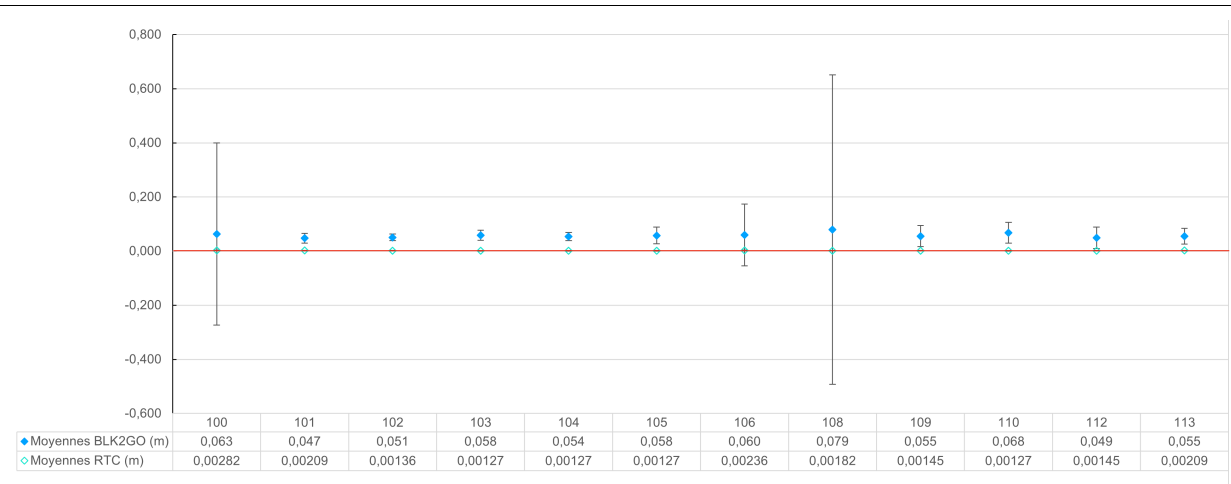
G7 - coupe nord (côté ouest)

Gr1 - coupe nord (côté ouest)



Source : CloudCompare™

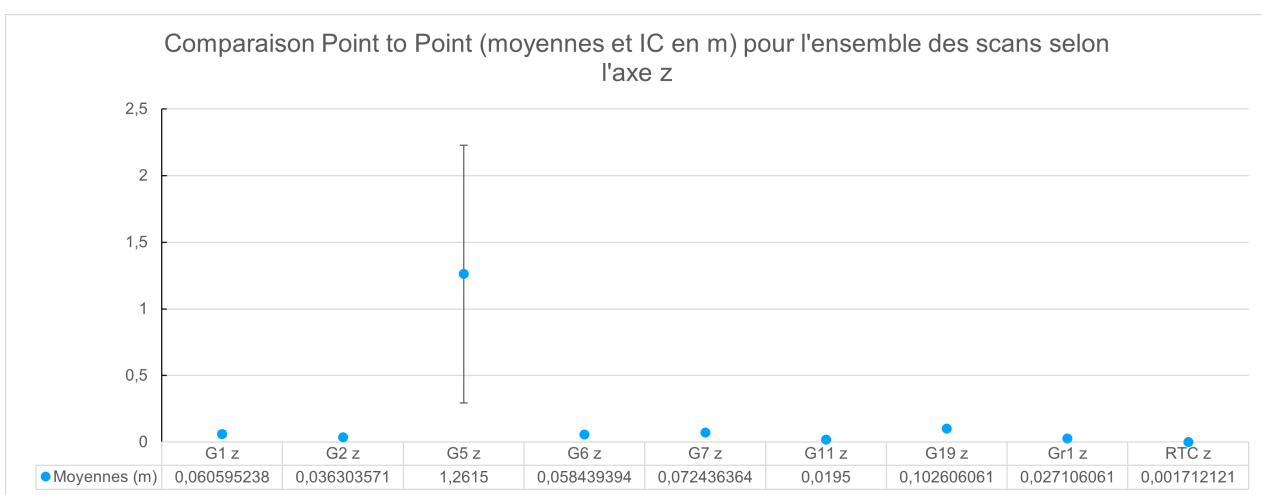
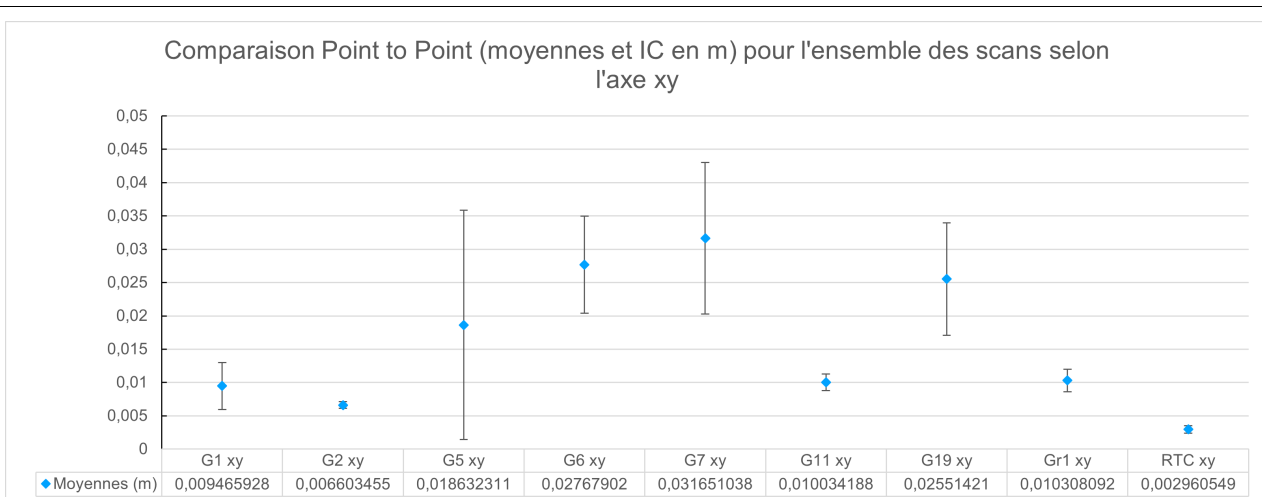
Annexe 8 : Comparaison Point to point (moyennes et IC en m) pour l'ensemble des cibles selon l'axe z



Auteur : Mossay (2022)

Source : Cyclone Register 360

Annexe 9 : Comparaison Point to point (moyennes et IC en m) pour l'ensemble des cibles selon le plan xy et l'axe z

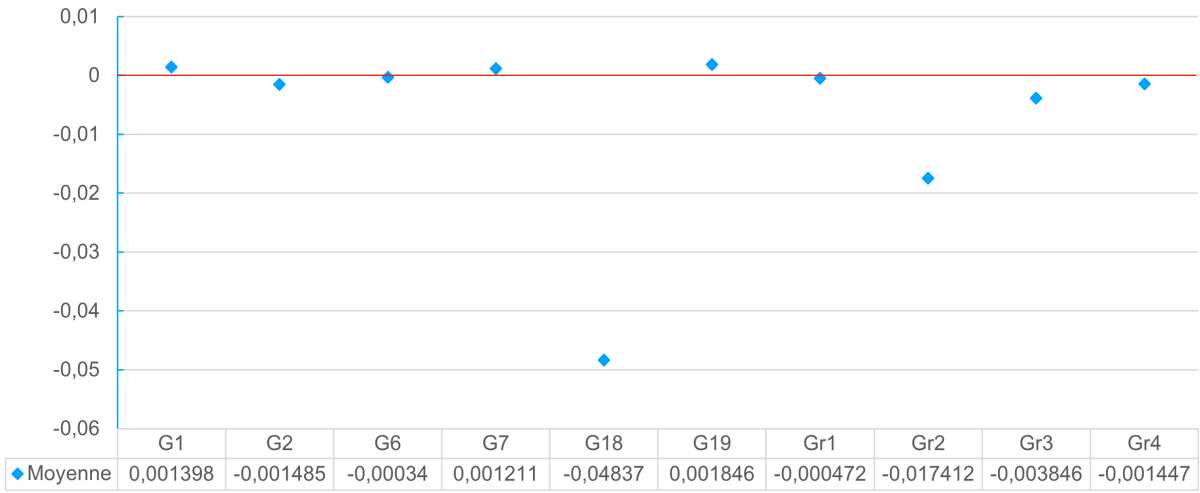


Auteur : Mossay (2022)

Source : Cyclone Register 360

Annexe 10 : Figure Comparaison Cloud to mesh

Comparaison Cloud to Mesh (moyennes et IC en m) pour l'ensemble des scans



Auteur : Mossay (2022)

Source : CloudCompare™