



Implantation et évaluation de la performance d'une méthode d'ajustage en mode statique des systèmes lidar mobiles terrestres

Mémoire

Papa Médoune Ndir

Maîtrise en Sciences Géomatiques
Maître ès sciences (M. Sc.)

Québec, Canada

© Papa Médoune Ndir, 2019

Implantation et évaluation de la performance d'une méthode d'ajustage en mode statique des systèmes lidar mobiles terrestres

Mémoire

Papa Médoune Ndir

Sous la direction de:

Christian Larouche, directeur de recherche

Résumé

De nos jours, les Systèmes Lidar Mobile (SLMs) sont utilisés dans une multitude de disciplines professionnelles liées à l'arpentage du territoire. À l'instar des systèmes de cartographie mobile basés sur la photogrammétrie, un SLM terrestre offre un grand potentiel en permettant aux professionnels du territoire d'être plus efficace à réaliser des opérations de mesurage courantes avec un portrait complet communément appelé "nuage de points".

À partir d'une plateforme mobile terrestre (véhicule routier), aérienne (drone) ou marine (navire), sur laquelle repose un système de navigation (INS-GNSS) combiné avec un ou plusieurs scanners laser, le SLM permet d'acquérir des données géospatiales 4D (x, y, z, t) avec une précision et un niveau de détail élevés. Toutefois, l'intégration de ces capteurs de fonction et de grade différents requiert une procédure de contrôle et de validation des paramètres d'intégration, en vue de bonifier la valeur ajoutée du nuage de points. Les paramètres d'intégration d'un SLM sont : les angles de visée, la latence et les bras de levier. Les angles de visée sont les trois angles d'orientations relatives entre le repère du scanner et le repère de l'IMU. Elles représentent une des sources d'erreurs majeures à laquelle il faut s'attaquer pour éliminer les incohérences parmi les nuages de points issus du même recouvrement. La latence est un délai de synchronisation temporelle des capteurs du SLM. Elle est associée au temps de géoréférencement d'un point lidar par rapport à sa mesure physique. Les bras de levier sont des distances entre l'origine du repère d'un capteur vers un autre. L'exactitude des retours lidar d'un SLM est donc intimement liée à l'ajustage de cette chaîne métrologique complexe.

Actuellement, avec la démocratisation du marché et la diminution du coût d'achat, le montage d'un SLM devient une recette subjective, mais l'intégration demeure une tâche complexe et ardue. Cependant, mis à part les grandes compagnies comme Riegl, Leica et Trimble qui disposent de méthodes d'ajustage propre aux systèmes qu'ils commercialisent, il n'existe pas de méthodes d'ajustage indépendant du SLM permettant à l'utilisateur de contrôler les paramètres d'intégration. Le but de ce projet de recherche consiste à rendre accessible aux utilisateurs de tous azimuts une méthode d'ajustage des angles de visée, générique et simple à implanter, qui ne demande pas l'utilisation d'instruments spécialisés de laboratoire. L'obtention de résultats aussi fiables que ceux obtenus par des méthodes de détermination plus laborieuses, représentant la réelle valeur ajoutée de cette méthode.

Abstract

Nowadays, the Mobile Lidar Systems (MLSs) are used in a multitude of professional disciplines related to territory mapping. Following the example of Mobile Mapping Systems (MMS) based on photogrammetry, a ground-based MLS offers an interesting potential by allowing the geospatial professionals to be more efficient at carrying out routine measurement operations with a complete portrait commonly known as a “point cloud”.

From a mobile terrestrial (road vehicle), airborne (drone) or marine (ship) platform, where a navigation system (INS-GNSS) combined with one or several laser scanners are fixed, the MLS allows the acquisition of 4D (x, y, z, t) geospatial data with a high level of precision and detail. However, the integration of these sensors of different grade and utility requires a procedure for control and validation of the integration parameters to improve the added value of the point cloud. The integration parameters of an MLS are: boresight angles, latency and lever arms. The boresight angles are the three relative orientation angles between the scanner frame and the IMU frame. They are one of the major sources of error that must be tackled in order to eliminate discrepancies among point clouds from overlapping passes. The latency is a time synchronization delay of the MLS sensors. It is associated with the geolocalisation time of a lidar return point with respect to its physical measurement. Lever arms are distances between the origin frame of one sensor to another. The accuracy of lidar ranging from a MLS is therefore intimately bounded to the rigorous adjustment of this complex metrological set.

Currently, with the democratization of the market and the increased accessibility of low cost solutions, the integration of an MLS becomes a subjective recipe but it remains a complex and difficult task. However, aside from well renowned commercial solutions such as Riegl, Leica and Trimble, whose adjustment methods remains specific to theirs products, independent adjustment methods of MLS that allow the user to control their integration parameters are still needed. The goal of this research project is to provide a wide range of users with a generic, easy-to-implement boresight angles adjustment method that does not require the use of top-grade laboratory instruments, while at the same time achieving results as reliable as more labored adjustment methods, representing then a real added value.

Table des matières

Résumé	iii
Abstract	iv
Table des matières	v
Liste des tableaux	viii
Liste des figures	xi
Remerciements	xviii
Introduction	1
Mise en contexte	1
Problématique	4
Objectifs	6
Solutions proposées	7
1 Revue de littérature	10
1.1 Présentation d'un système lidar mobile (SLM)	10
1.2 Définition des termes métrologiques importants associés aux SLMs	15
1.3 État des connaissances actuelles	17
2 Méthodologie de l'ajustage statique	33
2.1 Préparation des données à l'ajustage	33
2.2 Ajustage des angles de visée d'un SLM sans positionnement et sans latence	41
2.3 Mise en place du patron de lignes d'ajustage statique	51
2.4 Détermination du plan d'expérience optimal pour l'ajustage statique	55
2.5 Ajustage de la latence d'un SLM	68
2.6 Ajustage du biais de portée d'un scanneur 2D	74
2.7 Critères de validation des résultats	76
3 Acquisition et traitement des données lidar mobile	79
3.1 Description du flux d'opérations	79
3.2 Traitement des données lidar mobile	94
3.3 Flux d'opérations et données lidar utilisées à titre de vérité terrain	117
4 Présentation des résultats expérimentaux	127
4.1 Données lidar mobile MX2 pour l'estimation des angles de visée	127

4.2	Données lidar mobile pour l'estimation de la latence	135
4.3	Données lidar mobile pour l'estimation du biais de portée	135
5	Analyse des résultats	142
5.1	Angles de visée	142
5.2	Latence	151
5.3	Biais de portée	151
5.4	Validation des résultats	153
	Conclusion	155
	Retour sur la méthode d'ajustage des angles de visée d'un SLM en mode statique	155
	Recommandations pour la poursuite des travaux	156
	Bibliographie	160
	Annexes	164
A	Trimble MX2	165
A.1	Performances POS LV en mode RTK et DGPS	165
A.2	Dessin technique du MX2 single head annoté	166
B	Angles d'attitude en temps réel pour l'ajustage des angles de visée (POS LV)	167
B.1	Angles d'attitude pour les stations statiques (36) en mode SPS : 12 10 2017	167
B.2	Performances POS LV 220 en mode SPS : 12 10 2017	168
B.3	Angles d'attitude pour les stations statiques (36 + 16) en mode SPS : 17 05 2018	168
B.4	Performances POS LV 220 en mode SPS : 17 05 2018	169
B.5	Angles d'attitude pour les stations statiques (16) en mode SPS : 24 05 2018	169
B.6	Performances POS LV 220 en mode SPS : 24 05 2018	170
B.7	Angles d'attitude pour les stations statiques (36 + 16) en mode SPS : 12 06 2018	170
B.8	Performances POS LV 220 en mode SPS : 12 06 2018	171
B.9	Angles d'attitude pour les stations statiques (36 + 16) en mode SPS : 21 08 2018*	172
B.10	Performances POS LV 220 en mode SPS : 21 08 2018*	172
C	Angles d'attitude posttraités pour l'ajustage des angles de visée (POS-Pac)	173
C.1	Angles d'attitude pour les stations statiques (36) en mode PPK : 12 10 2017	173
C.2	Performances POS LV 220 en mode PPK : 12 10 2017	174
C.3	Angles d'attitude pour les stations statiques (36 + 16) en mode PPK : 17 05 2018	174
C.4	Performances POS LV 220 en mode PPK : 17 05 2018	175
C.5	Angles d'attitude pour les stations statiques (16) en mode PPK : 24 05 2018	175
C.6	Performances POS LV 220 en mode PPK : 24 05 2018	176
C.7	Angles d'attitude pour les stations statiques (36 + 16) en mode PPK : 12 06 2018	176
C.8	Performances POS LV 220 en mode PPK : 12 06 2018	176

C.9	Angles d'attitude pour les stations statiques (36 + 16) en mode PPK : 21 08 2018*	176
C.10	Performances POS LV 220 en mode PPK : 21 08 2018*	177
D	Traitements	178
D.1	Routines Scilab et Matlab	178
D.2	Vitesses propres calculées par POSPac (latence POS-lidar)	181
D.3	Vitesses angulaires calculées par POSPac (latence IMU-lidar)	183
D.4	Performances POS LV220 des levés en mode statique du 16-05-2018 et du 20-08-2018	184
D.5	Performances POS LV220 des levés en mode dynamique	186
E	Photos lors de l'acquisition des données terrain	189
E.1	Levés statiques	189
E.2	Levés latence	191
E.3	Levés biais de portée	193
E.4	Levés en mode dynamique (véhicule)	194
E.5	Levés lidar terrestre statique SX10	195
F	Tests statistiques sur le facteur de variance	196
F.1	Patron de lignes de 16 stations	196
F.2	Patron de ligne de 36 stations	197

Liste des tableaux

1.1	Budget d'erreur et performance d'un système hybride GNSS/INS, (Vosselman and Maas, 2010)	20
1.2	Budget d'erreur d'un éventail de scanners (Wang et al., 2008; Leslar, 2016)	21
1.3	Budget d'erreur des paramètres d'ajustage d'un SLM (Keller and Sternberg, 2013)	24
1.4	Valeurs finales, des angles de visée et du biais de portée, déterminées par ajustage dynamique <i>in-lab</i> , Landry (2017)	28
2.1	Repères d'un SLM	34
2.2	Optimisation du patron de lignes sur plan incliné, axe de roulis, erreur d'alignement de $0,5^\circ$ simulé	60
2.3	Optimisation du patron de lignes sur plan incliné, axe de tangage, erreur d'alignement de $0,5^\circ$ simulé	62
2.4	Optimisation du patron de lignes sur plan incliné, axe de lacet, erreur d'alignement de $0,5^\circ$ simulé	65
2.5	Plan d'expérience optimal pour l'ajustage statique des angles de visée φ_b, θ_b et ψ_b	66
2.6	Résultats d'ajustement des angles de visée en ajoutant un bruit gaussien aux données d'attitude (3 angles d'Euler φ, θ, ψ des stations)	67
2.7	Résultats d'ajustement des angles de visée en ajoutant un bruit gaussien aux tirs lidar simulés	67
2.8	Résultats d'ajustement des angles de visée en combinant ces deux erreurs aléatoires	67
3.1	Performances du Trimble MX2 en RMS (Root Mean Square)*, Applanix (Trimble, 2013a)	83
3.2	Paramètres d'ajustage MX2 convention NED	84
3.3	Plan d'acquisition pour l'ajustage des angles de visée, Casault (Roulis)	86
3.4	Plan d'acquisition pour l'ajustage des angles de visée, Casault (Tangage-Lacet)	86
3.5	Plan d'acquisition pour l'ajustage des angles de visée, Casault (Lacet)	87
3.6	Carnet de notes des levés statiques pour l'ajustage des angles de visée	87
3.7	Données télémétriques observées lors des levés statiques pour l'ajustage des angles de visée	89
3.8	Carnet de notes du levé dynamique pour l'ajustage de latence POS-lidar	90
3.9	Données télémétriques observées : 24-05-2018	90
3.10	Carnet de notes du levé statique pour l'ajustage de latence IMU-lidar	91
3.11	Données télémétriques observées : 29-05-2018	91

3.12	Données télémétriques observées : 15-06-2018	91
3.13	Carnet de notes du levé statique pour le biais de portée (Site 3)	92
3.14	Données télémétriques observées : 16-05-2018	93
3.15	Carnet de notes du levé statique pour le biais de portée (Site 5)	93
3.16	Données télémétriques observées : 20-08-2018	93
3.17	Levés effectués en mode dynamique sur le campus de l'Université Laval	94
3.18	Observations du scanneur SOCS : .csv vs .las	96
3.19	Impact des bras de levier 1a	101
3.20	Impact des bras de levier 1b	102
3.21	Impact des bras de levier 2a	102
3.22	Impact des bras de levier 2b	102
3.23	Comparaison de l'impact du biais de portée sur l'ajustage des angles de visée	104
3.24	Distance de décalage DX calculée entre les deux passages au plan S2	107
3.25	Distance de décalage DX calculée entre les deux passages au plan S3	108
3.26	DX moyen et vitesse moyenne pour les plans S2 et S3	108
3.27	Écart transversal maximum pour Pn1, Pn2 et Pn3	113
3.28	Distances dN et dS au site 5 : portée brute	113
3.29	Distances entre les deux murs au site 5 : portée corrigée (Landry2017)	114
3.30	Spécifications techniques de la SX10 (Station, 2016)	118
3.31	Points d'appui pour le géoréférencement direct des observations lidar (campus de l'U.Laval)	118
3.32	Données télémétriques du levé effectué les 7 et 8 juillet 2018 (SX10)	120
3.33	Carnet de notes et données télémétriques SX10	121
3.34	Écart transversal maximum pour Pn1, Pn2 et Pn3	124
3.35	Distances dN et dS au site 5 : vérité terrain	124
3.36	Estimation de la normale au plan d'ajustage site1	126
4.1	Levé du 12 octobre 2017, Patron de 36 stations, Solution 1 à 5	128
4.2	Levé du 17 mai 2018, Patron de 16 stations, Solution 1 à 5	129
4.3	Levé du 17 mai 2018, Patron de 36 stations, Solution 1 à 5	130
4.4	Levé du 24 mai 2018, Patron de 16 stations, Solution 1 à 5	131
4.5	Levé du 12 juin 2018, Patron de 16 stations, Solution 1 à 5	132
4.6	Levé du 12 juin 2018, Patron de 36 stations, Solution 1 à 5	133
4.7	Levé du 21 août 2018, Patron de 16 stations, Solution 1 à 5	133
4.8	Levé du 21 août 2018, Patron de 36 stations, Solution 1 à 5	134
4.9	Latence POS-lidar estimée au site 4	135
4.10	Distances moyennes projection et 3D associées aux écarts-types au site 3	136
4.11	Moyenne des écarts de distances du MX2 au site 3	138
4.12	Distances moyennes projection et 3D associées aux écarts-types au site 5	139
4.13	Écarts de distances en 3D au site 5 : portée brute	139
4.14	Moyenne des écarts de distances du MX2 au site 5 sans correction	139
4.15	Distances moyennes projection et 3D associées aux écarts-types au site 5 : portée corrigée (Landry2017)	140
4.16	Écarts de distances en 3D au site 5 : portée corrigée (Landry2017)	140
4.17	Moyenne des écarts de distances du MX2 au site 5 avec correction (Landry2017)	140
4.18	Distances moyennes projection et 3D associées aux écart-types au site 3	141
4.19	Distances moyennes projection et 3D associées aux écart-types au site 5	141

5.1	Valeurs finales obtenues par ajustage statique (MX2 single head)	150
5.2	Fidélité des données du MX2 au site 3	152
5.3	Fidélité des données du MX2 au site 5	152
F.1	Test statistique pour la validation des solutions d'ajustage des angles de visée du SLM MX2 avec un patron de lignes de 16 stations	196
F.2	Test statistique pour la validation des solutions d'ajustage des angles de visée du SLM MX2 avec un patron de lignes de 36 stations	197

Liste des figures

0.1	À gauche, système lidar mobile aéroporté (ALS) pour l'acquisition d'un modèle numérique de terrain (MNT). À droite, nuage de points d'un levé urbain à basse résolution	2
0.2	À gauche, vue d'une maison sous plusieurs angles à partir d'un nuage de points collecté par un SLM terrestre (Rieger et al., 2008). À droite, vue d'un tunnel ferroviaire à partir d'un nuage de points collecté par un SLM terrestre. (Leica, 2017)	2
0.3	Lidar mobile : ALS vs SLM (LandSurveys, 2018)	3
1.1	Composantes de base d'un SLM (Tecnitop S.A., 2018). À gauche, du haut vers le bas, la figure montre 1-un support de caméra additionnelle (ex. : Ladybug 360°); 2-un scanneur laser Leica P40 (un scanneur Z+F 9012 ou un Velodyne HDL-32 pourrait aussi être utilisé); 3-une prise d'alimentation pour une durée d'opération jusqu'à 10h; 4-un support de montage pour toit; 5-un ordinateur intégré. À droite, 1-une antenne GNSS Novatel Propak 6; 2-un capteur de luminosité pour contrôler le temps d'exposition; 3-un système de 8 caméras CCD avec une performance de 4 Mega Pixels pour une couverture 360°; 4-des manches pour manipuler le système; 5-une IMU offrant une fréquence de mesure de 200 Hz.	11
1.2	Quatre catégories de scanneur pour SLM. [1] Riegl VQ-250, [2] Sick LMS 291 S, [3] Velodyne HDL-32E, [4] FARO FOCUS 3D X130	12
1.3	Performance et application des centrales d'attitude (Passaro et al., 2017).	13
1.4	Odomètre aidant au système de navigation du SLM terrestre	14
1.5	Levé lidar mobile (SLM aérien).	19
1.6	Angles de visée entre IMU et scanneur, dans le repère de l'IMU	22
1.7	À gauche, section transversale d'une surface (toit d'un bâtiment) levé par le ULS Microdrone (5 passages). À droite, vue aérienne d'un bâtiment (Pavillon Casault situé sur le campus de l'Université Laval) levé par le SLM terrestre MX2 (5 passages). Dans les deux cas, on note des décalages entre les nuages de points issus d'un même recouvrement à différentes époques.	23
1.8	En haut, montage du site de calibrage intérieur, en bas, nuage de points d'une sphère qui a servi de point d'appui.	28
1.9	Vue schématique de la méthode d'estimation de la latence totale d'un SLM au moyen d'une table tournante. Le centre M' de la sphère au temps de mesure t utilise l'orientation mesurée par l'IMU au temps t+dt.	29
1.10	À gauche, montage sur table tournante, à droite, lignes de scan versus nuage de points.	30

1.11	Support de montage du SLM MX2 monté sur une structure mécanique portée par un charriot mobile. Ce montage permet d'exécuter la procédure de mesure pour l'ajustage des angles de visée et de la latence.	31
2.1	Convention NED du repère bS (Legris et al., 2017).	35
2.2	LGF vs LAF. ϕ et λ représentent la latitude et la longitude géodésiques. Φ et Λ représentent la latitude et la longitude astronomiques.	36
2.3	Référentiel géodésique local d'un SLM.	36
2.4	Convention NED vs ENU du repère corps b	37
2.5	Référentiel terrestre (TRF)	38
2.6	Système lidar mobile terrestre. L'IMU, le scanneur et l'antenne GNSS sont fixés sur un support commun, ce qui simplifie la mobilisation de l'équipement, minimise les bras de levier et permet une utilisation indépendante de la charge utile vis-à-vis de la plateforme de transport.	42
2.7	Ligne de scan statique sur une surface plane. Le vecteur directeur v_{bL} est obtenu par ajustement des observations brutes dans le repère local du scanneur. Dans le repère de navigation, on peut distinguer l'orientation attendue $v_n = C_{bI}^n C_{bI^*}^{bI} C_{bS}^{bI^*} v_{bL}$, qui nécessite la connaissance de la matrice de cosinus directeur des angles de visée, de l'orientation observée $v'_n = C_{bI}^n C_{bS}^{bI^*} v_{bL}$ qui ignore cette matrice.	44
2.8	Le vecteur directeur v_{bL} de la ligne de scan et la normale au plan d'ajustage ν_n	45
2.9	À gauche, vue de dessus d'un plan vertical, α représente l'angle de tir par rapport à ν_n entre $0/180^\circ$. À droite, vue de face d'un plan horizontal, β représente l'angle de tir par rapport à ν_n entre $0/90^\circ$ (LeScouarnec et al., 2013)	46
2.10	Vue schématique d'une station de scan du SLM par rapport à une surface plane horizontale.	52
2.11	Plan vertical orienté parallèlement à la direction Nord en X, à une distance D sur l'axe Y.	53
2.12	Projection de deux lignes de scan en sens opposé. À gauche, plan vertical, à droite, ligne de scan représentant le profil du plan	54
2.13	Mésalignement de deux lignes de scan causé par un angle de visée en roulis de signe positif (Keller P. et al., 2013).	57
2.14	Effet d'un mésalignement causé par l'erreur de roulis, à gauche plan droit, à droite plan incliné. $\psi_1 = 0^\circ$ direction Nord, ligne bleue et $\psi_2 = 180^\circ$ direction Sud, ligne magenta.	58
2.15	Orientation du plan par rapport à l'axe Z; à gauche $C = -1$ (inclinaison vers l'est), au centre $C = 0$ (inclinaison nulle) et à droite $C = 1$ (inclinaison vers l'ouest)	59
2.16	Distance angulaire non observable entre deux orientations pour une erreur de tangage à partir d'une station statique perpendiculaire au plan.	60
2.17	Mésalignement de deux lignes de scan causé par un angle de visée en tangage de signe positif à l'aide d'un passage perpendiculaire au plan (Keller P. et al., 2013).	61
2.18	Station rasante pour observabilité du mésalignement des deux orientations des vecteurs	61
2.19	Effet d'un mésalignement causé par l'erreur de tangage, à gauche plan droit, à droite plan incliné. $\psi_1 = 80^\circ$ direction N-E, ligne bleue et $\psi_2 = 260^\circ$ direction S-O, ligne magenta.	62

2.20	Mésalignement sur un objet circulaire causé par un angle de visée en lacet de signe positif à l'aide d'un passage dynamique parallèle à l'objet (Keller P. et al., 2013).	63
2.21	Effet d'un mésalignement sur un plan causé par l'erreur de lacet de signe positif à l'aide d'un passage dynamique avec deux angles de rasance différents 80°/100° (Michael Leslar, 2016).	64
2.22	Effet d'un mésalignement causé par l'erreur de lacet, à gauche plan droit, à droite plan incliné. $\psi_1 = 80^\circ$ direction N-E, ligne bleue et $\psi_2 = 100^\circ$ direction S-E, ligne magenta.	65
2.23	Patron de lignes d'un passage dynamique avec angle de rasance pour détecter la latence d'un SLM sur des plans verticaux (Keller et al., 2013).	69
2.24	Patron de lignes d'un passage dynamique avec angle de rasance pour détecter la latence d'un SLM sur un mur de bâtiment	70
2.25	Illustration du mécanisme de scan lidar sur un plan vertical lors d'une acquisition en mode dynamique (Rieger et al., 2010).	71
2.26	Illustration du mécanisme d'acquisition en mode statique pour l'ajustage de la latence IMU-lidar	72
2.27	Mésalignement de l'orientation de la ligne de scan causé par la latence IMU-lidar	74
2.28	Site d'analyse des performances du SLM situé entre les deux tours de l'Université Laval. À droite, Pavillon Félix-Antoine Savard et à gauche, Pavillon de la Faculté des Sciences de l'éducation.	75
2.29	Site d'analyse des performances du scanneur situé à l'entrée du pavillon de métrologie et de géodésie de l'Université Laval. Pavillon d'éducation physique et sportive PEPS.	76
3.1	Vue aérienne du campus de l'Université Laval. Les cinq sites choisis pour l'acquisition des différents jeux de données requis dans ce projet de maîtrise. Ces sites sont localisés respectivement au Casault (1) et (2), entre les deux tours FSE et FAS (3), sur la rue de la Terrasse(4) et au PEPS (5).	80
3.2	Site 1 : mur nord du Pavillon Casault utilisé pour l'ajustage des angles de visée.	81
3.3	Site 2 : façade principale et mur du côté nord du Pavillon Casault présentant des plans avec des orientations rasantes et inclinées qui seront utilisés pour l'analyse de performances des résultats obtenus par ajustage des angles de visée.	81
3.4	Site 3 : façade de la tour Sud. Les plans entre les rangées de fenêtres seront utilisés pour mener une analyse de performances.	82
3.5	Site 4 : plans servants à détecter la latence POS-lidar situés sur la rue de la Terrasse. Ces plans seront scannés à différentes vitesses. Un chariot sera utilisé, car le site est inaccessible en voiture.	82
3.6	Système lidar mobile Trimble MX2 <i>single head</i> monté sur le rack installé sur le toit d'un véhicule.	83
3.7	Plan d'acquisition pour ajustage statique des angles de visée $\varphi_b, \theta_b, \psi_b$ d'un SLM.	85
3.8	Croquis des 6 positions pour la procédure d'acquisition de l'ajustage statique des angles de visée $\varphi_b, \theta_b, \psi_b$ (Casault).	86
3.9	Workflow d'opérations pour l'acquisition des données lidar mobiles SLM MX2 (partie 1).	88
3.10	Workflow d'opérations pour l'acquisition des données lidar mobiles SLM MX2 (partie 2).	88

3.11	Levé lidar mobile pour latence POS-lidar	90
3.12	Levé lidar mobile statique entre les deux tours (Crédit : Cassol,2017).	92
3.13	Workflow du traitement des données lidar mobile (POSPac-Trident)	94
3.14	Workflow d'estimation des paramètres d'ajustage (angles de visée)	95
3.15	À gauche convention ENU extrait de Trimble MX2, (2013).; à droite NED vs ENU	97
3.16	SOCS vs ENU	97
3.17	Patron de lignes de 36 stations d'ajustage statique dans Trident superposés à un nuage de points RGB de la SX10	99
3.18	Workflow de validation des résultats avec Trident	100
3.19	Vue en perspective des nuages de points au site 4, passage 1 et 2 dans le logiciel Trident.	105
3.20	Vue en relief des nuages de points au site 4, passage 1 et 2 dans le logiciel Trident.	106
3.21	Calcul de la distance de décalage du nuage de points du passage 1 par rapport à celui du passage 2 (Plan S2) dans le logiciel Trident.	107
3.22	Fausse détection de latence IMU-lidar au Site 1	109
3.23	Zone d'extraction des données lidar pour la série 1	110
3.24	Zone d'extraction des données lidar pour la série 2	110
3.25	Distances, au Pn1, entre les murs nord et sud obtenues avec le Trimble MX2	111
3.26	Distances, au Pn2, entre les murs nord et sud obtenues avec le Trimble MX2	112
3.27	Distances, au Pn3, entre les murs nord et sud obtenues avec le Trimble MX2	112
3.28	Mésalignement en roulis, deux nuages de points du pavillon Casault représentés par deux couleurs différentes y sont montrés.	115
3.29	Mésalignement en tangage, deux nuages de points du pavillon Casault représentés par deux couleurs différentes y sont montrés.	115
3.30	Mésalignement en lacet, deux nuages de points d'un lampadaire représentés par deux couleurs différentes y sont montrés.	116
3.31	Comparaison des nuages de points de la SX10 et du MX2, Casault	117
3.32	Levé topographique et scan 3D. En rouge les stations occupées par la SX10 et en vert les points géodésiques rattachés (Crédit Cassol, 2017)	119
3.33	Zone d'extraction des données lidar pour la série 1	121
3.34	Zone d'extraction des données lidar pour la série 2	122
3.35	Distances, au Pn1, entre les murs nord et sud obtenues avec la SX10	122
3.36	Distances, au Pn2, entre les murs nord et sud obtenues avec la SX10	123
3.37	Distances, au Pn3, entre les murs nord et sud obtenues avec la SX10	123
3.38	Workflow de validation des résultats avec CloudCompare	125
3.39	Distribution gaussienne des points lidar, du plan d'ajustage statique, acquis avec la SX10, CloudCompare	126
4.1	Écarts, au Pn1, entre les données du MX2 et de la SX10	137
4.2	Écarts, au Pn2, entre les données du MX2 et de la SX10	137
4.3	Écarts, au Pn3, entre les données du MX2 et de la SX10	138
5.1	Répétabilité du roulis avec 16 stations. Ligne orange, valeurs finales du 17-05-2018; ligne bleue, valeurs finales du 24-05-2018; et ligne verte, valeurs finales du 12-06-2018.	144

5.2	Répétabilité du roulis avec 36 stations. Ligne orange, valeurs finales du 12-10-2017; ligne bleue, valeurs finales du 17-05-2018; et ligne verte, valeurs finales du 12-06-2018.	144
5.3	Répétabilité du lacet avec 16 stations. Ligne orange, valeurs finales du 17-05-2018; ligne bleue, valeurs finales du 24-05-2018; et ligne verte, valeurs finales du 12-06-2018.	145
5.4	Répétabilité du lacet avec 36 stations. Ligne orange, valeurs finales du 12-10-2017; ligne bleue, valeurs finales du 17-05-2018; et ligne verte, valeurs finales du 12-06-2018.	145
5.5	Alignement fin de l'IMU du 17-05-2018. Ligne magenta : trajectoire en temps réel; ligne verte : trajectoire posttraitée.	147
5.6	Alignement fin de l'IMU du 21-08-2018. Ligne magenta : trajectoire en temps réel; ligne verte : trajectoire posttraitée.	148
5.7	Répétabilité du tangage avec 16 stations. Ligne orange, valeurs finales du 17-05-2018; ligne bleue, valeurs finales du 24-05-2018; et ligne verte, valeurs finales du 12-06-2018.	149
5.8	Répétabilité du tangage avec 36 stations. Ligne orange, valeurs finales du 12-10-2017; ligne bleue, valeurs finales du 17-05-2018; et ligne verte, valeurs finales du 12-06-2018.	149
5.9	Fidélité des mesures de portée du MX2 comparée à celle de la SX10 sur un même plan.	152
5.10	Comparaison relative des nuages de points en recouvrement issus de 5 passages : levé MX2 en mode dynamique (Casault).	153
5.11	Comparaison absolue de deux nuages de points : levé MX2 vs SX10 (Casault : avant l'application des paramètres d'ajustage)	154
5.12	Comparaison absolue de deux nuages de points : levé MX2 vs SX10 (Casault : après l'application des paramètres d'ajustage)	154
5.13	Procédure fastidieuse d'acquisition pour l'ajustage des angles de visée.	158
5.14	Méthode d'ajustement et d'extraction d'une ligne avec l'algorithme RANSAC.	159
A.1	POS LV Applanix 2018	165
A.2	Repères du MX2 single head	166
B.1	Angles de navigation $\phi\theta\psi$: 12 10 2017	167
B.2	Incertitudes en RMS des angles de navigation $\phi\theta\psi$: 12 10 2017	168
B.3	Angles de navigation $\phi\theta\psi$: 17 05 2018	168
B.4	Incertitudes en RMS des angles de navigation $\phi\theta\psi$: 17 05 2018	169
B.5	Angles de navigation $\phi\theta\psi$: 24 05 2018	169
B.6	Incertitudes en RMS des angles de navigation $\phi\theta\psi$: 24 05 2018	170
B.7	Angles de navigation $\phi\theta\psi$: 12 06 2018	171
B.8	Incertitudes en RMS des angles de navigation $\phi\theta\psi$: 12 06 2018	171
B.9	Angles de navigation $\phi\theta\psi$: 21 08 2018. * Levé avec 2 antenne GNSS (GAMS)	172
B.10	Incertitudes en RMS des angles de navigation $\phi\theta\psi$: 21 08 2018	172
C.1	Angles de navigation $\phi\theta\psi$: 12 10 2017	173
C.2	Incertitudes en RMS des angles de navigation $\phi\theta\psi$: 12 10 2017	174
C.3	Angles de navigation $\phi\theta\psi$: 17 05 2018	174
C.4	Incertitudes en RMS des angles de navigation $\phi\theta\psi$: 17 05 2018	175

C.5	Angles de navigation $\phi\theta\psi$: 24 05 2018	175
C.6	Incertitudes en RMS des angles de navigation $\phi\theta\psi$: 24 05 2018	176
C.7	Angles de navigation $\phi\theta\psi$: 21 08 2018. * Levé avec 2 antenne GNSS (GAMS) .	177
C.8	Incertitudes en RMS des angles de navigation $\phi\theta\psi$: 21 08 2018	177
D.1	Vitesse lors du passage 1 au plan S2	181
D.2	Vitesse lors du passage 2 au plan S2	182
D.3	Vitesse lors du passage 1 au plan S3	182
D.4	Vitesse lors du passage 2 au plan S3	183
D.5	Vitesse angulaire : levé du 29-05-2018	183
D.6	Vitesse angulaire : levé du 15-06-2018	184
D.7	SBET IAKAR 16052018	184
D.8	Incertitudes en RMS des angles de navigation $\phi\theta\psi$ 16052018	185
D.9	SBET IAKAR 20082018	185
D.10	Incertitudes en RMS des angles de navigation $\phi\theta\psi$ 20082018	186
D.11	SBET IAKAR 01112017	186
D.12	Incertitudes en RMS des angles de navigation $\phi\theta\psi$ 01112017	187
D.13	SBET IAKAR 24052018	187
D.14	Incertitudes en RMS des angles de navigation $\phi\theta\psi$ 24052018	188
E.1	Station D5 levé statique.	189
E.2	Station B2 levé statique	190
E.3	Station E2 levé statique	190
E.4	Station A1 levé statique	191
E.5	Passage devant les plans S1 S2 S3 en mode dynamique avec SLM monté sur un charriot	191
E.6	Montage mécanique : charriot	192
E.7	Montage mécanique : cadre pour rotation angulaire en roulis	192
E.8	Acquisition lidar mobile au site 3	193
E.9	Acquisition lidar mobile au site 5 : les 2 antennes GNSS sont utilisées.	193
E.10	MX2 + G360 montés sur le rack du véhicule	194
E.11	Opérateur chargé de l'enregistrement des données équipé d'un ordinateur por- table.	194
E.12	Acquisition des données lidar avec la SX10 au site 3. À gauche, station à la tour nord et à droite station à la tour sud	195
E.13	Station UL 1604, acquisition des données lidar avec la SX10 au site 1	195

In Africa, when children have grown up, they leave their parents' hut, and build a hut of their own by its side. (...) We have grown up in it, and it is good to be alive in it. We simply want to build our own huts

Léopold Sédar Senghor
(1906-2001)

Remerciements

Les stages Mitacs Accélération, par l'entremise du CIDCO, ont été très pertinents pour faire avancer mes connaissances très rapidement. Un transfert des programmes développés, nécessaires à l'ajustement des angles de visée et un soutien du personnel lié à la recherche et au développement des méthodes d'ajustage proposées dans ce mémoire ont permis d'aboutir aux résultats escomptés.

Je tiens à remercier les compagnies ressources qui m'ont été d'une grande aide pour rendre ce travail possible. L'équipe de Trimble Imaging a délivré une licence gratuite pour utiliser le logiciel Trident pendant toute la durée du projet. L'équipe d'Applanix a aussi mis à ma disposition une licence pour le logiciel Pospac MMS lors de multiples renouvellements.

Je tiens aussi à remercier l'équipe de Cansel, qui m'a généreusement prêté la SX10 pendant une période de 3 jours pour effectuer des levés 3D de qualité dont les résultats ont servi de complément pour effectuer l'analyse des performances du SLM. Benoit Lachapelle m'a aussi offert une formation gratuite pour utiliser l'instrument et m'a délivré une licence gratuite de deux mois pour effectuer mes traitements avec le logiciel TBC 4.10.

Je tiens à remercier Guy Montreuil, technicien senior qui s'occupe de la gestion et la logistique du Laboratoire de métrologie depuis plusieurs années, qui m'a beaucoup aidé tout au long de mes sessions d'acquisition de données en plus de mettre à disposition sa voiture personnelle pour faire deux levés routiers. Sa créativité et son savoir-faire ont aussi permis de mettre en place des montages qui ont été très utiles lors de ce projet.

Stéphanie Bourgon, assistante de cours et de travaux dirigés depuis plusieurs années au département, qui a aidé à recueillir les informations pratiques nécessaires au post-traitement en mode relatif avec les données du réseau des stations de bases permanentes du MRN, mais aussi des stations de référence privées. Elle m'a offert son aide afin de décortiquer certains aspects théoriques et pratiques de la science des données. Elle m'a aussi aidé à planifier mes levés conventionnels et à trouver des pistes dans l'exécution de mes tâches.

Marc Cocard, pour m'avoir accepté aux études de 2^e cycle et pour ses enseignements dans le cadre du cours de compensation avancée et des trois cours de premier cycle dont les outils pratiques développés m'ont permis de bien mener mon projet de recherche.

Nicolas Seube, pour sa vision et son expérience qui a été une ligne directrice de mon projet. Sa disponibilité lors de mon premier stage Mitacs m'a permis de faire une bonne prise en main de la méthodologie liée à l'ajustage des angles de visée et de la latence. Sans compter ses enseignements sur l'ajustement des plans et sur la navigation inertielle.

En terminant, je tiens à remercier Christian Larouche, mon directeur de recherche et superviseur, qui m'a grandement aidé à avancer et à orienter mes travaux dans la bonne direction. Ses enseignements sur le lidar terrestre et le lidar mobile, de même que sur la prise en main des logiciels POSPac et Trident m'ont été très utiles. Je le remercie pour son implication dans ce projet qui m'a été à plusieurs reprises d'un grand secours !

Aux camarades, Willian Ney Cassol et Mohsen Hassanzadeh Shahraji avec qui j'ai eu de multiples échanges de connaissances qui ont enrichi mon savoir et ma contribution. Willian a assisté et a fourni une aide constante durant tous mes levés avec le SLM. Mohsen a été très pertinent dans la compréhension des aspects de base liés à l'ajustage et sans doute avec ses conseils à la fois comme un frère et un collègue.

Fari et Bijou, une grande source de stabilité dans ma vie ! Aissatou et Amadou loins des yeux, mais proches du coeur. Mes parents pour leur soutien inconditionnel et leur amour débordant. Je ne serais certainement pas rendu à ce niveau sans leur présence et leur bénédiction. Je vous aime du fond de mon cœur.

Sans votre collaboration ce travail n'aurait pu aboutir. Merci !

Dieu, l'omniprésent et l'unique, qui vient avant tout cela et qui me donne la santé et la capacité d'entreprendre mes projets. Je sollicite sa guidance et sa bénédiction tout au long de ma vie.

Introduction

Mise en contexte

Les systèmes de télémétrie mobile terrestre ont fait leur apparition au début des années 90. Parmi les premiers systèmes opérationnels, on peut citer le GPSVan développé au centre cartographique de l'Université de l'État d'Ohio. Celui-ci était composé de deux caméras monochromes CCD, de deux caméras vidéo en couleur, d'un récepteur GPS de code C/A et de capteurs de navigation (odomètre et gyroscope) embarqués sur une camionnette (Ellum and El-Sheimy, 2002). Typiquement, les systèmes utilisés aujourd'hui ont les mêmes caractéristiques mis à part quelques variantes rendues possibles grâce aux avancées technologiques. Parmi celles-ci, une nouvelle technologie, le LiDAR (Light Detection And Ranging), voit le jour dans les années 95 (Joinville et al., 2003). Il désigne un capteur actif qui génère des impulsions à l'aide d'un faisceau laser continu ou discontinu, puis qui reçoit et analyse la réflexion directe de ces dernières causée par contact avec un objet de la scène (Larouche, 2017).

En pratique, on distingue deux catégories de systèmes de télémétrie mobile terrestre sur le marché : le système doté uniquement de capteurs passifs qui a fait son apparition au début des années 90 et le système doté d'un couplage de capteurs actifs et passifs qui fait son apparition au début des années 2000. D'une part, les systèmes comme GPS-Van, *VISATTM*, *GIMTM*, *ON – SIGHTTM*, et plus récemment le MX7 utilisent des caméras pour numériser la scène environnante. D'autre part, les SLMs comme MoSES (Graefe et al., 2001) et plus récemment le MX2, le Pegasus, et le VMX-1HA utilisent des mesures de télémétrie laser comme principale technologie de numérisation. Néanmoins, ces systèmes sont équipés de caméras qui servent notamment à coloriser les nuages de points en assignant des valeurs dans les champs de couleurs RGB. Le terme lidar mobile désigne alors les scanneurs laser fixés sur des plateformes mobiles comme des autos, des trains, des bateaux et même des véhicules tout-terrain (Puente et al., 2013). En général, les scanneurs à balayage 2D sont utilisés pour mesurer la géométrie dans le cas des SLMs. Le déplacement cinématique du SLM dans un axe perpendiculaire au profil de scan 2D permet de générer la couverture 3D. La quatrième dimension est le temps associé à chaque mesure, qui est fourni par le système de navigation INS/GNSS. Ce mémoire accorde une attention particulière au SLM terrestre et à la problématique de précision imposée par certaines applications.

Les applications lidar mobile sont très diversifiées et parmi les plus répandues, on peut citer la modélisation 3D très précise du relief terrestre connue sous le nom de modèle numérique de terrain (MNT) générée à partir de données acquises d'une plateforme aéroportée (Airborne Lidar System-ALS). Le SLM terrestre quant à lui donne un autre avantage comparé à ce dernier en offrant une cartographie plus détaillée d'un phénomène couvrant une zone de petite dimension et vue sur plusieurs angles. La résolution et le niveau de détails deviennent donc plus élevés pour des applications de cartographie urbaine, d'inventaire minier ou encore de modélisation d'une infrastructure à une vitesse relativement grande. La figure (0.1) présente des types d'applications ALS alors que la figure (0.2) des produits obtenus à partir de l'usage d'un SLM terrestre. La figure (0.3) illustre le chevauchement entre les deux principales applications lidar mobile.

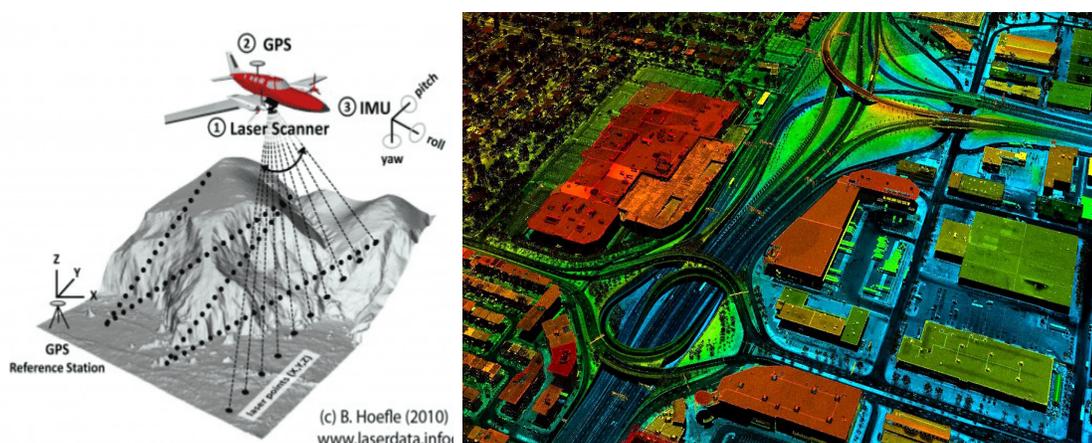


FIGURE 0.1 – À gauche, système lidar mobile aéroporté (ALS) pour l'acquisition d'un modèle numérique de terrain (MNT). À droite, nuage de points d'un levé urbain à basse résolution

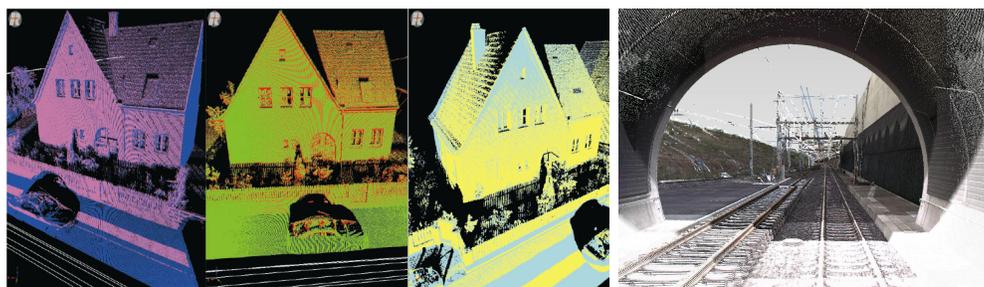


FIGURE 0.2 – À gauche, vue d'une maison sous plusieurs angles à partir d'un nuage de points collecté par un SLM terrestre (Rieger et al., 2008). À droite, vue d'un tunnel ferroviaire à partir d'un nuage de points collecté par un SLM terrestre. (Leica, 2017)

La principale caractéristique d'un système lidar mobile est la géoréférence directe. Elle permet de déterminer la position et l'orientation du système qui sont variables en fonction du temps.

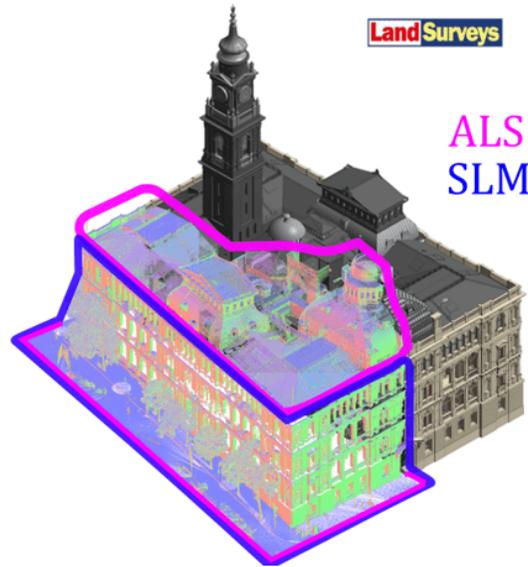


FIGURE 0.3 – Lidar mobile : ALS vs SLM (LandSurveys, 2018)

Cela permet ainsi dans les applications de grande envergure, de sauver beaucoup de temps et d'argent liés à l'acquisition de données sur le terrain en éliminant les opérations d'arpentage classique préalable pour définir un canvas géodésique.

Dans une optique minimaliste, la géolocalisation des données d'un lidar mobile se fait en combinant les observations locales du scanneur, de l'IMU (unité de mesure inertielle) et du récepteur GNSS dans une équation de géoréférencement directe. Cette équation consiste à opérer une suite de transformations géométriques entre les différents repères des capteurs. Ces transformations géométriques nécessitent la connaissance de la convention des repères de chaque capteur, mais aussi des paramètres d'intégration du SLM. Les paramètres d'intégration s'identifient aussi par les paramètres d'ajustage. Ce sont des valeurs d'angles (angles de visée), de distances (bras de levier) et de biais temporel (latence) qui doivent être ajustées pour corriger les défauts d'alignement entre les capteurs. Ces désalignements causent un décalage entre les nuages de points géoréférencés issus d'un même recouvrement après un minimum de deux passages.

Dans le cas d'un levé routier, marin ou aéroporté, les nuages de points présentent des erreurs angulaires et linéaires qu'on peut facilement distinguer en observant les zones de recouvrement. Les erreurs angulaires proviennent du manque d'ajustage des angles de visée et de la latence. Les erreurs linéaires quant à elles proviennent d'un défaut d'ajustage des bras de levier et de l'exactitude des distances mesurées par le scanneur. Il est donc essentiel de procéder à l'élimination de ces sources d'erreurs systématiques pour préserver la qualité et la confiance qui sont des facteurs clés préalables à l'utilisation des données. Aujourd'hui, la majeure partie des utilisateurs qui personnalisent leur système lidar mobile sont laissés à leur sort pour

développer leur propre méthode d'ajustage, ce qui demande un travail long et ardu qui annule le gain de temps anticipé au départ (Filin, 2003).

Pour réaliser ce travail, nous faisons appel à la métrologie. La métrologie est la science de la mesure qui définit des procédés et des méthodes permettant de garantir et de maintenir la confiance envers les mesures résultant d'un processus de mesure. Dans le domaine du lidar mobile, nous parlerons de la propagation des erreurs pour calculer la variance d'un retour lidar, des méthodes de contrôle qualité par géodésie ou microgéodésie, et des méthodes d'étalonnage et d'ajustage d'un système de mesure pour éliminer ou réduire les erreurs.

Problématique

Dans ce projet, nous considérons la problématique d'ajustage des angles de visée d'un SLM terrestre, composé d'un scanneur à balayage 2D, d'une centrale d'attitude (IMU) et d'un récepteur GNSS. Ce SLM permet de déterminer la position d'un retour lidar dans un système de coordonnées, défini par l'utilisateur, à partir des observations brutes provenant du scanneur, de l'IMU et du récepteur GPS. Ces observations sont des intrants du modèle mathématique de géoréférencement qui sera présenté plus loin dans ce mémoire. La présence d'un seul scanneur qui compose le SLM peut se justifier par la minimisation du nombre de paramètres à estimer. Autrement dit, il s'agit d'estimer un nombre de trois angles de visée. Par ailleurs, les scanneurs 2D ont une utilisation plus répandue que les scanneurs 3D en ce qui concerne les applications lidar mobile terrestre.

Dans de nombreuses applications, l'utilisation des données recueillies avec le lidar mobile demeure problématique en raison des enjeux suivants : les capteurs sont soumis à plusieurs sources d'erreurs, la scène observée montre des irrégularités (géomorphologie), la densité des numérisations et leurs prises de vues sont variables. De plus, lorsque le système n'est pas ajusté, les nuages de points issus de différents passages sont désalignés et leurs incertitudes sont mal estimées.

Le fabricant du SLM ou du capteur fournit à l'utilisateur la description de la performance quantitative de chaque capteur individuellement en tenant compte de certaines conditions d'opération. Cependant, l'incertitude type composée finale de la donnée n'est pas fournie à celui-ci. En effet, celle-ci estime l'exactitude vraisemblable de chaque point lidar géoréférencé en tenant compte de l'incertitude de mesure de chaque capteur, mais surtout de l'incertitude des paramètres d'ajustage utilisés lors des calculs. Les capteurs d'un SLM sont soumis à de multiples sources d'erreurs. Certaines de ces sources sont intrinsèques à ces capteurs, mais d'autres sont liées à l'intégration du système par l'utilisateur. De ce fait, le résultat du géoréférencement dépend de la qualité de la donnée fournie par chaque instrument, mais aussi des paramètres de montage (angles de visée et bras de levier) entre ces capteurs et des erreurs de synchronisation (time-tagging) entre les différentes données.

Mécaniquement, il est difficile de déterminer avec précision les angles de visée relatifs entre le scanneur et la centrale d'attitude (IMU). En pratique, ces derniers sont connus à quelques degrés près dépendamment de la qualité de l'intégration. Pour un système commercial, on a une erreur angulaire dont l'ordre de grandeur est inférieur à un degré (1°) alors que pour un système personnalisé, on parlera de plusieurs degrés. Dans les deux cas, on a une incertitude qui est beaucoup plus grande que celle de la mesure brute d'une IMU (par exemple $0,01^\circ$ de performance pour le grade tactique (Seube, 2015)). Les trois angles de visée permettent de déterminer exactement la matrice de transformation entre la centrale d'attitude et le scanneur. Par exemple, pour une cible située à 30 mètres de portée, une erreur angulaire de visée (boresight angle) d'un degré (1°) correspond à une erreur de visée de 50 cm (Gao and Spletzer, 2010).

Les bras de levier (lever-arms) quant à eux sont des distances de décalage (dans les trois dimensions) entre le centre de l'IMU et le centre d'émission du faisceau laser déterminés par des mesures mécaniques souvent exactes au centimètre et dans les meilleurs cas d'intégration au millimètre près. Pour cette raison, l'impact de l'incertitude associé est souvent insignifiant voir négligeable, pour un SLM terrestre qui est compact (bras de levier rarement plus grand qu'un mètre) comparé à un système ALS. Cette problématique ne sera pas adressée dans ce mémoire.

Un dernier élément à considérer, mais non le moindre, est le défaut de synchronisation entre les capteurs qui est causé par la configuration de la procédure d'enregistrement des données. En effet, lorsque la plateforme mobile est soumise à des vitesses angulaires et linéaires non constantes, les erreurs de latence détériorent significativement la cohérence entre les données du scanneur et celles de l'IMU, ainsi que l'incertitude des paramètres d'intégration déterminés par ajustage.

La portée générale de ce mémoire est d'élaborer une méthode d'ajustage des angles de visée :

- découplée de la latence et des bras de levier ;
- sans positionnement ;
- adaptée aux SLMs terrestres ;
- indépendante du type d'intégration ;
- offrant des résultats répétables et comparables à des méthodes d'ajustage plus laborieuses.

Le choix d'une méthode d'ajustage sans positionnement, se justifie par l'objectif d'estimer les angles de visée avec une incertitude de l'ordre de $0,01^\circ$, soit environ $36''$ secondes d'arc. Ce qui correspond à une erreur de l'ordre de 1mm sur 5m. L'incertitude de positionnement d'un vecteur de 5m par GNSS dépasse très largement cette barre d'erreur.

Objectifs

L'objectif principal de ce projet de maîtrise consiste donc à améliorer les performances de différents SLMs commerciaux et hybrides (personnalisés) suite à l'application d'une méthode d'ajustage statique et de comparer les forces et limites de cette méthode avec d'autres méthodes existantes. Dans un premier temps, la méthode d'ajustage sera testée au moyen de données simulées pour valider la méthode d'ajustage. Dans un deuxième temps, des données réelles seront acquises avec un SLM commercial disponible au laboratoire de métrologie. Dans ce cas, un site d'ajustage adapté devra être sélectionné sur le campus de l'Université Laval. Une analyse comparative des résultats obtenus vis-à-vis de la méthode d'ajustage en laboratoire développé par Landry et al., (2017), dans le cadre d'une autre recherche de maîtrise, fournira un inventaire des forces et limites de chaque méthode tout en faisant ressortir leur degré de complémentarité. Un aspect essentiel en métrologie est la répétabilité de la méthode d'ajustage. Les angles de visée IMU-LiDAR sont des valeurs propres à chaque système. En faisant abstraction des variables imprévisibles (par exemple, les changements irréguliers dans la procédure de mesure, le climat, les bris) ces valeurs sont supposées constantes. Dès que la méthode d'ajustage appliquée est reproduite, les valeurs déterminées pour un même système doivent être comparables lorsque la procédure est identique.

Par ailleurs, la méthode d'ajustage doit être indépendante du SLM utilisé ou du moins être facilement adaptable. Cette méthode doit aussi être robuste et précise afin d'éviter le transfert des erreurs entre les différents paramètres d'intégration du SLM. Autrement dit, l'ajustement de la latence et celle des bras de levier ne doivent avoir aucun impact sur les valeurs des angles de visée déjà déterminées par ajustage.

Pour collecter des données utiles à l'ajustage, la caractérisation individuelle de chaque erreur d'angle de visée sur le nuage de points sera étudiée afin de déterminer et de valider un plan d'expérience optimal pour l'estimation des angles de visée. Cet aspect constitue un second objectif à atteindre pour obtenir des résultats justes et fiables. Ceci devrait aussi garantir la répétabilité des valeurs estimées lors de différentes journées de collecte.

Le troisième objectif envisagé est l'analyse des performances obtenues suite à l'application des paramètres d'ajustage déterminés. Une réduction des écarts entre les nuages de points issus du même recouvrement constitue une bonne validation de l'atteinte du premier objectif. Un site permettant aussi de valider la qualité des résultats obtenus devra aussi être choisi pour la comparaison nuage à nuage des zones de recouvrement et des données de référence collectées par un scanner lidar terrestre statique.

Le quatrième objectif consiste à proposer une méthode d'estimation de la latence d'un SLM. Cette méthode doit être indépendante et facilement applicable sans nécessiter l'utilisation d'instruments spécialisés en laboratoire. Ceci vise à facilement exécuter la procédure d'acquisition des données utiles à l'ajustage. Les étapes menant à l'estimation seront également

élaborées et discutées.

Le dernier objectif consiste à détecter les erreurs de mesure intrinsèques d'un scanner 2D en utilisant des données étalons provenant d'une station totale. Les données acquises par le SLM seront comparées à celles-ci afin de vérifier s'il existe un biais de mesure qui affecte le SLM. En somme, l'objectif général est d'élaborer une méthode précise d'ajustage des angles de visée, de la latence et du biais de portée qui pourrait être appliquée sur un SLM terrestre, à l'aide d'outils et d'instruments usuels d'arpentage, pour permettre à un utilisateur qui aimerait rapidement monter son système de s'inspirer des méthodes de vérification des performances suggérées dans ce travail.

Solutions proposées

Pour éliminer les erreurs d'orientation, il faut identifier la présence d'erreurs systématiques dans le nuage de points géoréférencé qui est perturbé par l'incertitude couplée des trois angles de visée (roulis, tangage et lacet). Contrairement au bruit de mesure que l'on présume être distribué aléatoirement, l'erreur d'orientation est une erreur systématique qui, par définition, ne varie pas même après répétition de la mesure. En déterminant les conditions de mesure, nous pouvons enregistrer un certain nombre de critères qui décrivent l'incertitude de mesure, à savoir les erreurs ponctuelles, les erreurs dynamiques et les erreurs aléatoires (Seube, 2016). Nous parlerons donc d'une évaluation de type A d'un SLM telle que définie par le vocabulaire international de métrologie (VIM)(Joint Committee For Guides In Metrology, 2012).

L'évaluation d'une incertitude de mesure de type A consiste à évaluer une quantité d'observations provenant d'un système de mesure, à l'aide d'une analyse statistique, lorsque ces observations respectent des conditions de mesure définies. Dans un premier temps, pour estimer les angles de visée à partir de toutes les observations recueillies, on utilise une analyse statistique par moindres carrés. Suite à l'ajustage, les paramètres obtenus doivent être validés par une procédure d'analyse de performances du SLM.

Pour vérifier la performance d'un SLM, deux approches peuvent être préconisées (Filin and Vosselman, 2004). La première consiste à déterminer l'incertitude type composée du système (ITC) en utilisant un modèle métrologique en chaîne qui prend en considération les incertitudes types du lidar, de l'IMU et du système de positionnement (récepteur GNSS), mais aussi les incertitudes des paramètres d'intégration du SLM. La deuxième approche pour évaluer l'exactitude des paramètres d'ajustage consiste à comparer des nuages de points dans les zones de recouvrement. Ces zones permettent de détecter la présence d'erreurs systématiques dans le jeu de données. Ces erreurs systématiques sont déterminées par ajustage. Ensuite, une comparaison nuage à nuage des zones de recouvrement d'un levé routier sera effectuée en utilisant les angles de visée fournis par le fabricant du SLM. Enfin, la même opération sera répétée en utilisant les angles de visée obtenus par ajustage. Pour terminer, l'utilisation

d'un scanner 3D pour collecter des nuages de points de référence sera effectuée de même que l'analyse des performances obtenues par comparaison des nuages de points issus de l'ajustage avec ceux-ci.

Tel que discuté, étant donné que les erreurs de mesure intrinsèques au scanner laser peuvent engendrer un déplacement linéaire du nuage de points, l'usage d'un scanner 3D en mode statique, qui n'est pas soumis aux mêmes sources d'erreurs qu'un SLM, permettra d'analyser l'incertitude de la portée du scanner 2D du SLM. Un modèle d'erreur ne sera pas utilisé pour déterminer cette erreur de mesure, mais plutôt une approche déterministe basée sur une analyse statistique pour évaluer la justesse des mesures de distances du SLM.

Pour résoudre la problématique des angles de visée, nous allons implanter une méthode robuste et avancée d'estimation des paramètres d'ajustage par moindres carrés. Par la suite, on déterminera l'amélioration de l'exactitude des nuages de points due à l'application de cette méthode d'ajustage. Cette méthode doit minimiser l'impact des erreurs systématiques liées aux autres paramètres d'intégration (latence et bras de levier). Ce choix s'explique par la nécessité d'obtenir des résultats répétables entre différentes collectes d'observations pour l'ajustage du SLM. Pour ce faire, on applique une méthode d'ajustage statique, qui consiste à utiliser les observations du scanner formant des lignes de numérisation acquises sur une surface plane à partir de différentes stations du SLM en mode statique. Le choix d'une méthode statique permet d'écartier les observations GNSS comme intrants dans le programme d'ajustement. De même, en restant stationnaire lors de la collecte d'observations, on suppose qu'aucun type de latence n'affecte celles-ci. Il s'agit ici de recueillir une série de mesures d'angles et de distances par rapport à une surface plane en se servant uniquement du scanner et de la centrale inertielle (IMU). Le mode statique permet d'éliminer toute vitesse pouvant engendrer des erreurs de latence. De plus, la position absolue du système n'a pas besoin d'être connue, de sorte que l'erreur associée aux positions GNSS est éliminée. Cette méthode d'ajustage est simple à implanter et ne demande pas l'utilisation d'instruments spécialisés de laboratoire. Les résultats escomptés doivent permettre de modéliser et d'éliminer ces erreurs systématiques. Les paramètres estimés doivent être comparables et aussi fiables que ceux obtenus par une méthode d'ajustage en laboratoire. Une répétabilité de la méthode vérifiée à l'aide de plusieurs jeux de données acquis à des époques différentes et une optimisation de la durée de la procédure de mesure et des traitements sont aussi anticipées. Pour atteindre cet objectif spécifique, une grande partie du travail a porté sur la mise au point d'un plan d'acquisition adapté à l'ajustage statique dans le contexte du SLM terrestre. Ce plan d'acquisition est un patron de lignes qui garantit l'observabilité des erreurs de roulis, de tangage et de lacet. Pour finir, en appliquant les paramètres estimés par cette méthode sur un levé réel avec le SLM, une diminution de l'incertitude des mesures calculées sur les nuages de points acquis par différents passages du SLM sur le même site devrait se concrétiser.

Ce mémoire présente donc la chronologie de réalisation de cette méthode d'ajustage. Au

chapitre 2, un état de l'art sur l'intégration d'un SLM est présenté. Par la suite, une revue des méthodes d'ajustage connues jusqu'à nos jours accompagnée d'un examen critique est réalisée. Au chapitre 3, la théorie de la cartographie lidar mobile et la théorie de l'ajustage des sources d'erreurs d'un SLM sont révélées. Au chapitre 4, le workflow de l'acquisition et le workflow de traitement des données du SLM utilisé dans ce projet sont montrés. Au chapitre 5, la présentation des résultats de l'ajustement des angles de visée, de l'ajustement de la latence et de la détermination du biais de portée est exhibée. Au chapitre 6, l'analyse des résultats obtenus et la discussion des facteurs de limitations à la démarche proposée sont abordées. Enfin, une conclusion, portant un retour sur les objectifs définis et des recommandations pour la poursuite des travaux, est formulée.

Chapitre 1

Revue de littérature

Dans l'introduction, une mise en situation de la portée du projet et une description de la problématique entourant un levé lidar mobile terrestre ont été effectuées. Dans ce chapitre, la complexité derrière ce système métrologique est exposée à travers une revue de l'état d'art dans un premier temps. Dans un deuxième temps, une définition des termes métrologiques associés au SLM terrestre et les principales méthodes d'ajustage seront abordées pour mieux comprendre la pertinence de la méthode d'ajustage implantée.

1.1 Présentation d'un système lidar mobile (SLM)

La figure (1.1) présente les trois composantes principales d'un SLM (scanneur laser, IMU et récepteur GNSS) auxquelles s'ajoute un ordinateur (intégré ou externe) dans lequel sont installés les différents logiciels servant à l'acquisition et à l'enregistrement des données. Celui-ci permet également de surveiller les performances du système durant l'acquisition, mais aussi de définir les paramètres liés à celle-ci.

Le capteur principal du SLM est le scanneur laser qui fournit, au moyen d'impulsions laser, une grande quantité d'observations composées de mesures d'angles (incidence du faisceau), de distances (portées) et d'intensités. En pratique, les scanners disponibles sur le marché sont nombreux et proviennent de fabricants variés. D'un point de vue performance, on peut distinguer deux principales catégories de scanners. Le premier, de grade cartographique a une exactitude de mesure de quelques centimètres (5-10cm) et le deuxième, de grade d'arpentage a une exactitude de mesure centimétrique et mieux (<1cm). Selon Petrie (2013), qui propose une classification d'un point de vue opérationnel, quatre catégories principales peuvent être identifiées : (1) le scanneur 2D, (2) le scanneur multicouche, (3) le scanneur multi-faisceau et (4) le scanneur 3D. Le scanneur 2D est un télémètre laser composé d'un émetteur et d'un récepteur regroupé derrière un miroir en rotation qui balaye un plan vertical, exemple VQ250 (Riegl, 2012) et SLM250 (Renishaw, 2016). Le scanneur multicouche balaye en général un minimum de quatre plans horizontaux à l'aide d'un champ de vue vertical (FOV : field



FIGURE 1.1 – Composantes de base d’un SLM (Tecnitop S.A., 2018). À gauche, du haut vers le bas, la figure montre 1-un support de caméra additionnelle (ex. : Ladybug 360°); 2-un scanneur laser Leica P40 (un scanneur Z+F 9012 ou un Velodyne HDL-32 pourrait aussi être utilisé); 3-une prise d’alimentation pour une durée d’opération jusqu’à 10h; 4-un support de montage pour toit; 5-un ordinateur intégré. À droite, 1-une antenne GNSS Novatel Propak 6; 2-un capteur de luminosité pour contrôler le temps d’exposition; 3-un système de 8 caméras CCD avec une performance de 4 Mega Pixels pour une couverture 360°; 4-des manches pour manipuler le système; 5-une IMU offrant une fréquence de mesure de 200 Hz.

of view). L’exemple le plus courant sur le marché est le capteur Sick utilisé dans l’industrie automobile. Il en est de même pour le scanneur multi-faisceau qui a initialement été développé par l’entreprise Velodyne pour les véhicules autonomes. Velodyne offre actuellement sur le marché un capteur de 16 lasers en rangée (Puck VLP-16), un capteur de 32 (HDL-32E) et un capteur de 64 lasers (HDL-64E). Ce type de capteurs est aujourd’hui principalement utilisé dans des applications de cartographie par drone, car il fournit une plus grande densité de points au sol et plus de fidélité (Puente et al., 2013). Ce capteur se caractérise par un poids plus léger. Le quatrième groupe est celui du scanneur lidar terrestre statique (scanneur 3D) utilisé par les arpenteurs-géomètres. Ce scanneur fournit des données très denses et de qualité. Les scanneurs laser peuvent être interférométriques, i.e. qu’ils utilisent comme mode de télémétrie la mesure de phase ou à temps de vol (laser pulsé). Les scanneurs comme le Faro X130, Faro X330 et le Zoller-Fröhlich Profiler utilisent le mode par mesure de phase. Ceux-ci permettent d’obtenir une incertitude sous la barre du millimètre. La seule limitation réside dans la portée maximale qui dépasse rarement quelques centaines de mètres. Les autres types de scanneurs qui utilisent la technique du temps de trajet (TOF :time of flight) entre l’émetteur et le récepteur peuvent atteindre facilement des portées de 800m (Riegl VQ-450) avec une incertitude moindre, voire comparable. Pour les applications lidar mobile terrestre, plusieurs fabricants intègrent des scanneurs de type temps de trajet comme Riegl VQ-450,

Optech Lynx, Leica P40 et Sick LMS-291. La figure (1.2) présente un exemple de ces quatre catégories. Les capteurs de catégorie 1 et 4 offrent des performances de mesure plus élevées que ceux des catégories 2 et 3, mais ils sont généralement plus dispendieux.

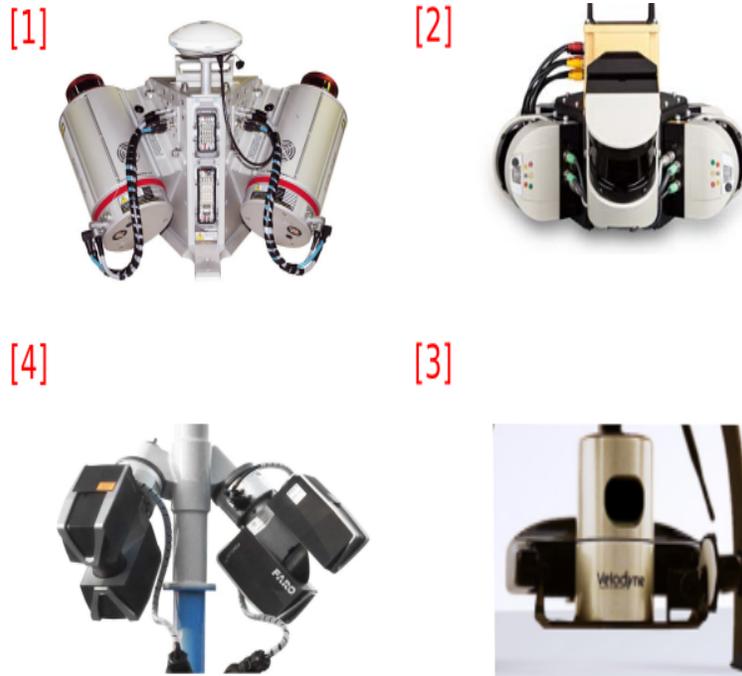


FIGURE 1.2 – Quatre catégories de scanner pour SLM. [1] Riegl VQ-250, [2] Sick LMS 291 S, [3] Velodyne HDL-32E, [4] FARO FOCUS 3D X130

La centrale inertielle d'attitude (IMU) détermine l'orientation du SLM par rapport au système de référence terrestre. Ce capteur est composé de trois gyroscopes montés sur trois axes orthogonaux pour mesurer les 3 angles d'Euler (roulis, tangage et lacet). Ces derniers sont complétés de trois accéléromètres et de trois magnétomètres identiques pour former une unité de mesure inertielle (IMU) servant à mesurer la dynamique de mouvement d'une plateforme mobile. Le système GNSS quant à lui fournit la position et la vitesse de celle-ci. En combinant ces deux capteurs, on obtient une solution de navigation optimale sur la trajectoire du mobile à une fréquence plus élevée et avec une meilleure estimation que ne pourrait le permettre le récepteur GNSS à lui seul et vice versa. L'IMU apporte de l'information sur l'orientation qu'on n'a pas avec une seule antenne GNSS. Le terme système de navigation inertielle (INS ou SNI) est souvent utilisé, lorsque l'IMU est intégré à un récepteur GNSS interne couplé à un algorithme de navigation (filtre de Kalman) pour effectuer l'intégration des observations d'orientation et de position en temps réel. Pour les SLMs terrestres, il y a trois types de centrale d'attitude qui sont communément utilisés selon Puente et al. (2013) : les systèmes micro électromécanique (MEMS), les gyroscopes à fibre optique (FOG) et les gyroscopes à ring laser (RLG). Le MEMS est un système bas de gamme très répandu qui est principalement

utilisé dans les applications ULS (UAV Lidar System) en raison de son poids très léger et de sa forme compacte. Il est formé de micros composantes de quartz intégrés à l'intérieur de puces en silicium. Pour le lidar mobile, c'est le capteur qui fournit la plus faible performance des mesures d'angles, mais offre un bon rapport qualité-prix pour le géoréférencement. Le gyroscope à fibre optique (FOG) fournit une performance acceptable pour les applications lidar mobiles, mais à un coût beaucoup plus élevé que le MEMS. Il est basé sur l'effet Sagnac (Passaro et al., 2017) qui consiste à mesurer le parcours de la lumière entre deux extrémités d'un long enroulement en fibre optique. Il en est de même pour le gyroscope à ring laser (RLG) qui offre une des meilleures performances de mesure sur le marché, mais à un coût très élevé. La figure (1.3) montre le spectre d'utilisation des différents types d'IMU en fonction de leur sensibilité tout en tenant compte des performances requises par type d'application.

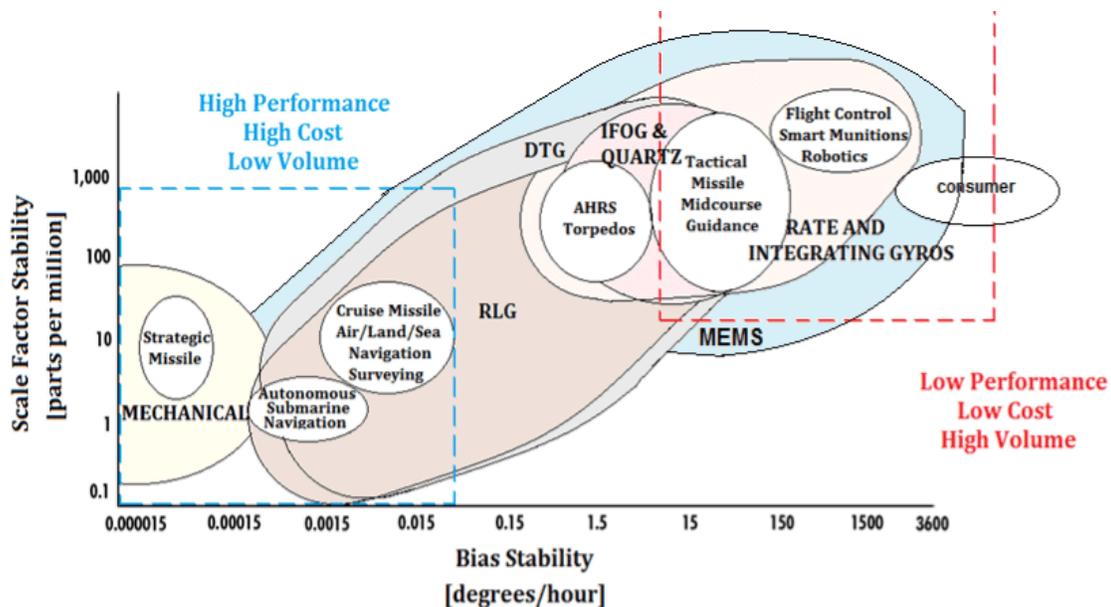


FIGURE 1.3 – Performance et application des centrales d'attitude (Passaro et al., 2017).

Quant à la position fournie par l'antenne GNSS, il y a trois principaux modes de positionnement : le mode différentiel (DGPS), le mode cinématique en temps réel (RTK) et le mode post-traitement (PPK). Le mode PPK consiste à recueillir des observations brutes qui seront traitées suite à l'acquisition des données sur le terrain en utilisant des observations d'une station de base permanente acquises à la même période temporelle. En pratique, le produit final extrait est un fichier représentant la meilleure solution de trajectoire (SBET : Smoothed Best Estimate of Trajectory). Cette technique permet d'obtenir les meilleurs résultats possibles, car les observations peuvent facilement être nettoyées et elles ne sont pas affectées de la latence causée par le délai de transmission (ou coupure) des corrections. Les observations recueillies en mode DGPS ou RTK peuvent aussi être améliorées par post-traitement. Ces deux modes s'opèrent de la même manière, mais ne donnent pas la même qualité de résultat. L'exactitude

des mesures DGPS est submétrique alors que celle des mesures RTK est centimétrique. Cependant, le RTK demande l'utilisation d'un récepteur bi-fréquence et d'une station de référence propre à plus ou moins 10km. Lors des levés il est aussi important de prendre en compte le facteur DOP (dilution of precision) en faisant une planification des sessions d'acquisition des données. Cet indicateur permet d'évaluer la contribution de la géométrie spatiale des satellites sur l'incertitude de position.

Très souvent, un capteur supplémentaire est ajouté au SLM pour améliorer la qualité des données de navigation : l'odomètre (DMI : Distance Measuring Instrument). Il est souvent fixé sur la roue d'un véhicule comme montré à la figure (1.4) et permet de mesurer la vitesse et d'en déduire la distance parcourue. Cela permet d'obtenir une trajectoire optimale lorsque les exigences du projet sont élevées.



FIGURE 1.4 – Odomètre aidant au système de navigation du SLM terrestre

Comme discuté ci-haut, pour chacune des composantes de base du SLM, il existe une large

gamme de performances permettant à l'utilisateur de monter un système idoine en fonction de ses besoins. Cependant, même le plus performant SLM ne garantit pas l'exactitude des données, car il n'y a pas d'instrument parfait (chap.3 Vosselman and Maas, 2010; Cocard, 2017). Les trois principales sources d'erreurs liées au SLM sont les limitations du système d'orientation et de position, les erreurs intrinsèques au scanneur et les paramètres d'intégration du SLM. Ces erreurs perturbent la qualité des observations. Une définition des termes caractérisant une observation de mesure individuelle et sa relation avec le jeu de données est présentée à la section suivante.

1.2 Définition des termes métrologiques importants associés aux SLMs

Cette section a pour but de présenter les termes métrologiques utilisés dans ce mémoire. Ces termes définissent des concepts fondamentaux de la métrologie provenant de la 3e édition du Vocabulaire International de Métrologie VIM– Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (JCGM, 2012), lesquels sont adaptés au contexte des SLMs.

L'exactitude de mesure est un terme qui désigne l'étroitesse de l'accord entre une valeur mesurée et une valeur vraie. Elle ne s'exprime pas numériquement, mais plutôt par l'absence d'erreur de mesure. On peut parler d'exactitude relative ou globale. L'exactitude relative consiste à comparer une géométrie dans un nuage de points à une géométrie connue. L'exactitude absolue consiste à comparer un nuage de points à un nuage de points propre (référence ou vérité) dans un système de coordonnées global.

La fidélité est l'aptitude d'un instrument de mesure à fournir des mesures concordantes entre elles. En répétant les mesures sur une même cible, on constate une dispersion des observations qui traduit la fidélité.

La justesse d'un instrument de mesure est l'écart entre la valeur moyenne des observations et la valeur vraie.

L'erreur de mesure est due à un ou plusieurs facteurs qui sèment un écart entre la valeur mesurée d'une grandeur et sa valeur de référence. Lorsqu'elle provient des défauts de fabrication de l'instrument de mesure ou de son assemblage, on parle d'erreurs systématiques. Les erreurs systématiques demeurent ponctuelles en répétant la mesure ou varient de manière prédictible. Plus la justesse d'un instrument augmente, moins celui-ci est affecté d'un biais. Selon Legat et al. (2006) l'origine des erreurs systématiques d'un SLM est l'effet des erreurs géométriques telles que :

- Les angles de visée ;
- Les bras de levier entre le point de référence de positionnement (PRP) et le centre de

perspective du lidar ;

- Le biais de portée du lidar ;
- Les erreurs d’alignement de l’IMU (négligeables pour les IMUs de grade tactique ou navigation, mais pondéreuses pour celles à faible coût, exemple MEMS) ;
- Les transformations géodésiques entre datums.

Lorsqu’elles proviennent de changements irréguliers lors de la procédure de mesure, soit du changement de température, du temps de réflectivité, de la géométrie de l’objet, de la densité des points, qui sont des variables imprévisibles, les erreurs sont nommées erreurs aléatoires. Elles proviennent de tous les capteurs, et peuvent être éliminées par répétition de la mesure. Elles se manifestent aussi par les erreurs dynamiques qui affectent la partie IMU-lidar et qui sont causées par :

- Les erreurs de synchronisation temporelles ;
- La variable d’état du système.

Finalement, l’erreur grossière est une erreur ponctuelle de mesure qui peut être causée dans le cas d’un nuage de points par :

- La performance du scanneur (mauvaise lecture de l’encodeur, fausse détection, obstruction, pixels mixtes) ;
- Le système GNSS (multitrajet, saut de cycle, perte de signal).

Il est possible de les détecter et de les éliminer en effectuant des approches de détermination empiriques qui demandent une intervention attentive de l’utilisateur.

Le biais de mesure est une erreur de mesure systématique estimée par étalonnage.

L’incertitude de mesure est un indicateur de la fidélité ou du degré de dispersion des observations d’un instrument. Elle se décrit par l’écart-type de la grandeur mesurée par un instrument de mesure, sous réserve que celle-ci soit comparable à la vraie valeur. En effet, si un instrument n’est pas étalonné (ou ajusté), l’incertitude sur la grandeur mesurée va être perturbée. Contrairement au fabricant d’un capteur qui fournit l’incertitude type de mesure, le fabricant du SLM ne fournit pas nécessairement celle des paramètres d’intégration (angles de visée surtout) et donc l’utilisateur non avisé ne les prend pas en considération. L’incertitude combine la justesse et la fidélité ((Larouche, 2019).

La correction est une compensation d’un biais de mesure.

L’étalon de travail est un étalon conçu pour l’étalonnage ou le contrôle d’instruments d’un système de mesures. Par exemple, une sphère matérialise une géométrie donnée dont on connaît le modèle de mesure avec une grande exactitude.

L'étalonnage est une opération effectuée dans un environnement contrôlé (laboratoire) et qui consiste à vérifier les mesures et leurs incertitudes qui doivent correspondre à l'indication de l'étalon et son incertitude associée. Cette information permet de déterminer l'ordre de grandeur de la correction à apporter au système de mesures pour obtenir un résultat de mesure en adéquation avec cette indication.

L'ajustage d'un système de mesure est une opération de correction réalisée pour permettre à un appareil de mesure d'afficher des valeurs correspondant à des valeurs exactes de la grandeur physique à mesurer. Dans le cas d'un SLM, les erreurs intrinsèques au capteur laser et celles des paramètres d'intégration doivent être minimisées pour éliminer les mésalignements et les décalages qui ont un effet observable (angulaire et linéaire) sur le nuage de points à l'aide d'une analyse locale. Cette opération est postérieure à l'étalonnage (JCGM, 2012).

La procédure de mesures est une description détaillée d'un mesurage conformément à un ou plusieurs principes de mesure et à une méthode de mesure donnée, fondée sur un modèle de mesure et incluant tout calcul destiné à obtenir un résultat de mesure. Dans notre cas, la méthode de mesure est liée à l'opération d'un SLM et à la fusion de données provenant de différents capteurs (IMU, GNSS, lidar) dans l'équation de géoréférencement d'un point lidar.

1.3 État des connaissances actuelles

1.3.1 Modèle mathématique

Tel que mentionné, l'ajustage des angles de visée d'un SLM est une étape fondamentale pour obtenir des jeux de données temporels cohérents et exacts. Pour ce faire, les sources d'erreurs systématiques doivent être éliminées ou minimisées. Plusieurs recherches se sont consacrées à cette tâche depuis plus d'une décennie. Selon Kumari et al. (2011); Skaloud and Lichti (2006) et Morin and El-Sheimy (2002) ces incertitudes de mesure sont liées à chaque capteur du SLM (GNSS/IMU/lidar), de même qu'aux paramètres d'intégration (angles de visée, latence, bras de levier) qui ont un effet sur l'incertitude finale du point géoréférencé. Dans ce cas, la procédure de mesure nous permet aussi de détecter toutes les sources d'erreurs potentielles affectant le SLM.

Les observations recueillies par le SLM sont réparties essentiellement au niveau de trois repères locaux propres à chaque capteur : le repère de navigation (n) qui représente le référentiel des observations de l'antenne GNSS ; le repère bI (body-Inertial) qui représente le repère de l'IMU et le repère bS (body-Scanner) qui représente le référentiel du scanner.

Dans ce mémoire, l'intérêt sera porté sur les angles de visée (φ_b, θ_b et ψ_b) entre le scanner et la centrale inertielle qui constituent des intrants de la matrice C_{bS}^{bI} dans l'équation de géoréférencement direct d'un point lidar suivante (Seube, 2016) :

$$X_n(t_L) := \begin{pmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{pmatrix} = P_n(t_P) + C_{bI}^n(t_I) (a_{bI} + C_{bS}^{bI}(\varphi_b, \theta_b, \psi_b) r_{bS}(t_L)) \quad (1.1)$$

Dans l'équation (1.1), les paramètres fournis par le SLM et par l'utilisateur sont :

- t_P : Temps associé aux observations du récepteur GNSS (signal PPS : Pulse Per Second) ;
- t_I : Temps associé aux observations de l'IMU C_{bI}^n (souvent le temps PPS) ;
- t_L : Temps associé à l'horodatage des observations du scanneur (souvent l'horloge interne) et au point géoréférencé X_n .

et

- X_n : Position 3D des points du nuage dans le repère de navigation ;
- $P_n(X, Y, Z)$: Position 3D du PRP (point de référence de positionnement) du SLM dans le repère de navigation (souvent donné par le récepteur GNSS) ;
- $C_{bI}^n(\varphi, \theta, \psi)$: Matrice de rotation calculée par la centrale d'attitude ;
- $a_{bI}(a_x, a_y, a_z)$: Bras de levier entre le PRP et le centre optique du scanneur, exprimés dans le repère de l'IMU, obtenus par ajustage du SLM ;
- $C_{bS}^{bI}(\varphi_b, \theta_b, \psi_b)$: Matrice de rotation (angles de visée) entre la centrale inertielle et le scanneur obtenu par ajustage du SLM ;
- $r_{bS}(x, y, z)$: Coordonnées du point mesuré par le scanneur dans son repère local.

La description détaillée des repères utilisés et leur convention d'axe seront traitées au chapitre 2. Les matrices de rotation sont des matrices de transformation qui permettent de permuter les observations d'un repère local à l'autre, lesquelles seront aussi traitées au chapitre 2. La figure (1.5) présente une illustration d'un levé lidar mobile à partir d'un drone comme plateforme.

1.3.2 Sources d'erreurs d'un SLM

Le lidar mobile a été originellement utilisé à bord des plateformes aéroportées avec l'arrivée des premiers scanneurs lasers à la fin des années 80 (Joinville et al., 2003). Les premières publications et la majorité de la bibliographie portant sur l'ajustage des paramètres de montage et sur l'analyse des performances sont relatives à ce contexte, car les objets mesurés sont très éloignés, ce qui rend les erreurs systématiques plus critiques. Toutefois, les sources d'erreurs que l'on vise à modéliser, affectent les SLMs terrestres de la même façon que les SLMs aéroportés (Chan et al., 2013). Une description des sources d'erreurs basée sur Vosselman and Maas (2010) est présentée ci-après.

Les erreurs du système d'orientation et de position (POS)

Le tableau (1.1) présente le budget d'erreur du POS pour un vecteur d'observations de 10km et moins. Un des avantages du couplage GNSS/INS est que d'une part l'IMU permet de filtrer

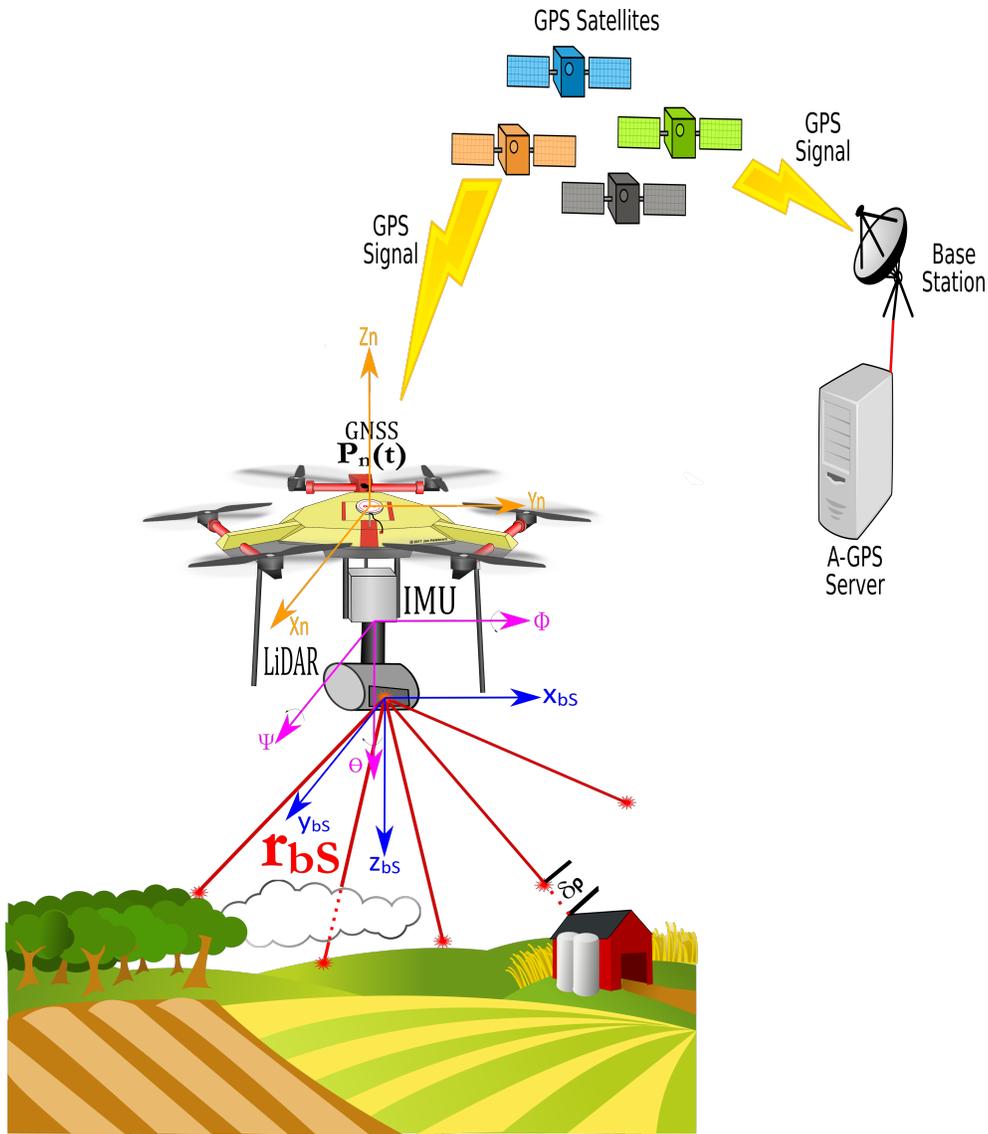


FIGURE 1.5 – Levé lidar mobile (SLM aérien).

les erreurs de courte durée liées au positionnement en maintenant la précision même après une coupure de signal de l'antenne. Ceci est très fréquent dans un contexte terrestre, par exemple dans les canyons urbains où des bâtiments élevés sont présents. Selon Skaloud et Lichti (2006), ce maintien est d'une période de 10-20 secondes pour un SNI de grade tactique (exemple FOG) et de 1-2 minutes (mns) pour un SNI de grade navigation (exemple RLG). Par la suite, l'exactitude se dégrade pour une période plus étalée. D'autre part, celui-ci permet de contrôler la position estimée qui varie avec le temps. Le processus du filtrage de Kalman permet aussi de décorréliser les erreurs d'alignement du système (la dérive du gyroscope et le biais de l'accéléromètre) des autres sources d'erreurs tout en les réajustant dans le temps. Les erreurs d'alignement de la centrale d'attitude se comportent comme des erreurs d'angles de

visée et doivent être vérifiées par ajustage. Selon Graefe (2007), l'exactitude de la trajectoire d'un SLM tourne autour de 3 cm. Les logiciels et le mode de traitement des observations GNSS/INS utilisés pour atténuer ces erreurs seront discutés dans le chapitre 3.

TABLEAU 1.1 – Budget d'erreur et performance d'un système hybridé GNSS/INS, (Vosselman and Maas, 2010)

GNSS			INS		
Satellite et signal	Sources	Erreur (m)	Grade navigation	Durée coupure	Roulis φ - Tangage θ (°)
	Troposphère	10^{-2} - 10^{-3}		1 s	0.0008 - 0.0014
	Ionosphère	10^{-2} - 10^{-3}		1-3 mns	0.0014 - 0.003
	Multitrajet	10^{-2}			Lacet ψ (°)
	Bruit	10^{-3}		1 s	0.0008 - 0.002
	Orbites	10^{-2}		1-3 mns	0.004 - 0.005
	Coupure	-		Durée coupure	Roulis φ - Tangage θ (°)
	Nombre de SVs/DOP	5 *		1 s	0.001 - 0.02
	Longueur vecteur	10 km *		1-3 mns	0.005 - 0.04
	Nombre vecteurs	1 *		Grade tactique	Lacet ψ (°)
Observations	Ambiguïtés	<100 ppm	1 s	0.001 - 0.05	
	Synchronisation horloge	-	1-3 mns	0.008 - 0.1	

* Exemple de cas de figure.

Les erreurs de télémétrie

Les erreurs liées au télémètre laser sont en lien avec la technique de mesurage utilisée et les paramètres physiques du scanneur. Selon Baltsavias (1999), Wang et al. (2008), pour les systèmes utilisant le mode temps de trajet ou laser pulsé, l'exactitude de la mesure va être corrélée à la résolution de mesure du temps de parcours de l'onde. Il s'agit d'une performance homogène de quelques centimètres pour ces systèmes alors qu'on parle de quelques millimètres pour les systèmes à déphasage. En pratique, cette erreur est estimée de la même manière que les angles de visée. Parmi les erreurs de télémétrie, on cite aussi l'erreur due à la divergence qui joue sur l'empreinte du faisceau laser. Elle résulte à une position aléatoire de la cible à l'intérieur de cette empreinte. L'erreur due à l'angle d'incidence du scanneur se comporte comme l'erreur d'angle de visée (erreur d'élévation causée par le tangage dans le cas d'un lidar vertical). Enfin, la réfraction atmosphérique des distances doit aussi être prise en compte par le scanneur ou la procédure de mesure.

TABLEAU 1.2 – Budget d’erreur d’un éventail de scanners (Wang et al., 2008; Leslar, 2016)

Télémètre laser			
	<i>Sources</i>	<i>Erreur (m)</i>	<i>Connu</i>
Quantifiable	Temps émission/réception (0.07 μ s @ 50m)	0.01	Fabricant
	Biais de portée	10 ⁻⁴ - 0.1	Fabricant/ Ajustage
	Résolution angulaire @ 50m	9E-4 - 9E-3	Fabricant/ Ajustage
	Divergence du faisceau @ 50m	0.007 - 0.03	Fabricant
	Erreur de zéro @ 50m	1 ⁻³ - 1 ⁻²	Fabricant/ Ajustage
	Facteur d’échelle @ 50m		Fabricant/ Ajustage
	Effet atmosphérique (1° @ 50m)	5E-05	Mesure
	Température interne (65.5-68° @ 10m)	0.01	Mesure
	Angle d’incidence et géométrie	-	ITC *
	Inclinaison axe de rotation	-	Fabricant
Non quantifiable	Position angulaire encodeur/miroir	-	-
	Torsion du miroir	-	-

* : Au tableau (1.2), l’ITC représente l’incertitude type composée d’un retour lidar calculé par propagation d’erreur à partir du modèle de mesure en tenant compte des sources d’erreurs. Une bonne mise en place de cette méthode et de son application pour un SLM peut être trouvée dans le mémoire de Cassol (2018).

Les bras de levier

Les bras de levier entre le PRP et le centre optique du scanner créent une incertitude de position du point X_n . Leur valeur est donnée par le fabricant du SLM et pour les applications terrestres, on note un ordre de grandeur de quelques décimètres, qui varie selon le système. Ils sont en pratique déterminés simultanément avec les angles de visée (Landry, 2017). La plupart des SLMs ne permettent pas de mesurer ces trois paramètres par microgéodésie, car les capteurs sont encastrés dans un boîtier d’assemblage et la seule alternative est la mesure marquée sur le croquis de dessin mécanique (Leslar et al., 2016). Selon Seube (2016), lors d’une évaluation de type A (ajustage ou propagation d’erreur), ce paramètre doit être pris en compte dans le cas d’un lidar qui balaie latéralement (i.e. : véhicule routier). Sinon, pour le lidar aéroporté la composante verticale du bras de levier n’est pas observable et devrait être considérée dans une évaluation de type B (mesure quantitative ou certificat d’étalonnage). Il est à noter que les bras de levier entre l’antenne GNSS et le centre de mesure de l’IMU (souvent PRP) sont calibrés automatiquement par certains logiciels de post-traitement (notamment Applanix POSPac). En somme, l’effet de l’incertitude des bras de levier aura un impact moins prononcé que celui des angles de visée.

Les angles de visée

Les angles de visée représentent une composante critique du budget d'erreur d'un SLM. Elles se décrivent comme les angles d'orientation entre le repère de l'IMU et le plan de balayage du scanner lidar. Étant donné que la triade d'axes pour chacun de ces capteurs n'est pas tangible, il est impossible de les aligner parfaitement tel qu'illustré à la figure (1.6). L'effet de l'angle de visée agit comme une rotation autour du centre optique du scanner qui varie en fonction du temps. De plus, ces trois angles (roulis, tangage, lacet) tel qu'on peut le voir à partir de l'équation (1.1) perturbent chaque retour lidar par couplage. On ne peut donc pas déterminer chaque angle successivement de manière individuelle (comme effectué de façon classique lors d'un ajustage des angles de visée d'un système hydrographique par exemple). Leur valeur varie d'un SLM à l'autre, mais peut atteindre quelques degrés ($0.1^\circ - 3^\circ$) selon Morin and El-Sheimy (2002). La figure (1.7) montre l'influence de ces erreurs sur des jeux de données lidar vertical et latéral. Comme indiqué à la figure (1.1), ces angles ne sont pas stables pour certains SLMs (comme le Pegasus) pour lesquels le scanner peut être démonté et utilisé à d'autres fins après chaque mission ou remplacé par un autre type de scanner.

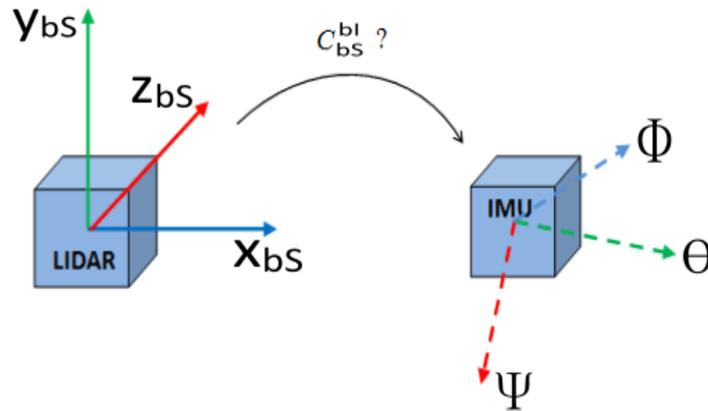


FIGURE 1.6 – Angles de visée entre IMU et scanner, dans le repère de l'IMU

La latence

Un dernier élément à considérer, mais non le moindre, est le défaut de synchronisation entre le temps INS et le temps lidar noté (dt_{LI}). Une erreur de cette latence peut détériorer significativement la cohérence entre les données du scanner et celles de l'IMU, mais aussi l'incertitude des paramètres d'intégration déterminés pour le montage d'un SLM. Notons que pour les systèmes d'acquisition modernes, il est possible de synchroniser tous les capteurs (IMU, scanner et GNSS) en utilisant le signal PPS. Selon Legris et al. (2017), la latence peut être réduite d'un point de vue matériel lorsque cette technique est bien établie. Le PPS est aussi soumis à l'incertitude de l'horloge du récepteur GNSS discutée plus haut. La latence

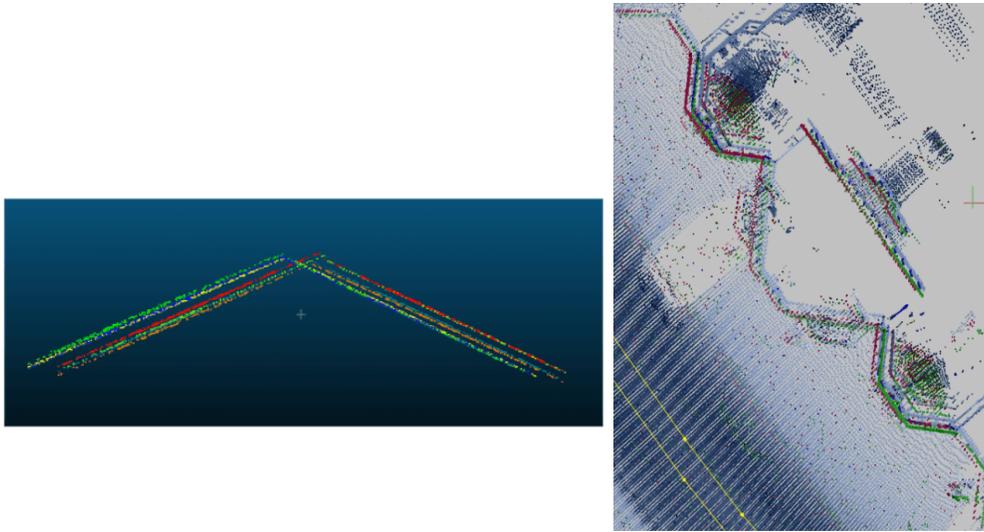


FIGURE 1.7 – À gauche, section transversale d’une surface (toit d’un bâtiment) levé par le ULS Microdrone (5 passages). À droite, vue aérienne d’un bâtiment (Pavillon Casault situé sur le campus de l’Université Laval) levé par le SLM terrestre MX2 (5 passages). Dans les deux cas, on note des décalages entre les nuages de points issus d’un même recouvrement à différentes époques.

est donc variable en fonction du montage et du récepteur GNSS et il est donc utile de l’estimer aisément. En pratique, on parle d’une latence totale qui est le délai de synchronisation entre le point géoréférencé et la mesure physique de l’orientation du SLM. Elle est composée par :

- Le temps de transformation de la mesure physique à l’électronique ;
- Le temps de transmission de la donnée ;
- Le temps d’acquisition ;
- Le temps de calcul.

Cette latence s’exprime sous deux formes de composantes :

$$dt_{LI} = t_L - t_I \quad (1.2)$$

$$dt_{LP} = t_L - t_P \quad (1.3)$$

où

- dt_{LI} représente la latence entre le scanneur lidar et l’IMU ;
- dt_{LP} représente la latence entre le scanneur lidar et le GNSS.

Selon Keller and Sternberg (2013), pour que l’incertitude liée aux paramètres d’intégration du SLM soit inférieure à celle de sa trajectoire, une indication du budget d’erreur du SLM présenté au tableau (1.3) doit être respectée. Plusieurs méthodes d’ajustage de ces paramètres peuvent être appliquées sur un SLM terrestre pour satisfaire ces exigences. Ces méthodes sont discutées ci-après.

TABLEAU 1.3 – Budget d’erreur des paramètres d’ajustage d’un SLM (Keller and Sternberg, 2013)

Paramètres d’intégration		
<i>Sources</i>	<i>Incertitude</i>	<i>Erreur (m)</i>
Angles de visée	0,005°	0,004 @ 50m
Latence	0,1ms	0,002 @ 72km/h
Bras de levier	2mm	4E-8 @ 50m

1.3.3 Méthodes d’ajustage d’un SLM

La méthode d’ajustage préférée pour estimer les paramètres du modèle de mesure est une méthode d’évaluation de type A qui utilise les observations brutes des capteurs et le modèle mathématique de géoréférencement d’un point lidar pour estimer les paramètres du montage d’un SLM. Ce modèle mathématique se retrouve dans la littérature (Miller and Habib, 2016; Vaughn et al., 1996; Skaloud and Lichti, 2006).

Les méthodes initiales d’ajustage sont inspirées de la photogrammétrie, notamment le processus d’ajustage spatial (transformation polynomiale) d’un bloc d’images basé sur l’utilisation de points d’appui (vérités terrain) issus de MNT ou d’imagerie aérienne. Cette technique ne s’intéresse pas à la détermination des sources d’erreurs, et par conséquent elle est considérée sous optimale (Vosselman and Maas, 2010; Morin and El-Sheimy, 2002).

La revue de littérature a permis de distinguer deux grandes approches d’ajustage des paramètres d’intégration d’un SLM. L’ajustage en mode dynamique qui est très répandu dans la littérature et qui s’inspire initialement de l’aérottriangulation. Son avantage principal est l’utilisation de sites d’ajustage naturels ou périurbains qui sont généralement cartographiés simultanément lors d’une mission de levé. Elle nécessite l’utilisation des données géoréférencées à partir de la trajectoire fournie par le système GNSS/INS. D’autre part, une approche plus récente appelée ajustage en mode statique qui n’utilise pas de trajectoire. Autrement dit, le SLM reste sur une position fixe arbitraire qui n’est pas nécessairement connue. Une brève description de chaque approche est présentée aux sections suivantes.

Ajustage d'un SLM en mode dynamique

Tel que mentionné, une des problématiques majeures de l'estimation des paramètres d'intégration est le couplage et la corrélation entre leurs différents effets géométriques. Schenk et al. (2001) propose une méthode basée sur des objets linéaires physiques comme un faite (intersection de deux toits) qui permet de corriger l'erreur de tangage et en partie celle de roulis d'un SLM aérien. En utilisant des surfaces inclinées (toit), Burman (2000) développe une méthode d'ajustage basée sur un patron de lignes permettant d'estimer par moindres carrés les trois angles de visée et la composante verticale des bras de levier en comparant les décalages des profils de bâtiments dans les zones de recouvrement. De là émerge une nouvelle tendance d'ajustage en mode dynamique basé sur des patrons de lignes de recouvrement en utilisant des objets planaires (Vosselman and Maas, 2001; Filin, 2003; Filin and Vosselman, 2004; Friess, 2006; Skaloud and Lichti, 2006). Filin (2003) propose une estimation a priori des paramètres du plan pour améliorer la robustesse de cette technique. Pour se démarquer de l'approche utilisée en photogrammétrie (dont le principal inconvénient est lié à l'erreur de divergence), Skaloud and Lichti (2006) développent une méthode davantage rigoureuse pour l'ajustage d'un ALS permettant d'estimer les angles de visée et le biais de portée du scanneur en ajustant les points sur des éléments de surface naturels et des constructions humaines. Les paramètres des plans utilisés sont estimés simultanément aux angles de visée par une équation de contrainte et une analyse statistique permet de déterminer le meilleur ajustage possible. Cette méthode est automatisable d'une manière pratique et permet d'ajuster des SLMs avec différents types de scanneurs (Skaloud and Schaer, 2007). Elle sert de référence aux méthodes d'ajustage des scanneurs 3D terrestre (Bae and Lichti, 2007) et aux méthodes d'ajustage des SLMs terrestres (Rieger et al., 2010; Larouche, 2012; Sands, 2017). La procédure du levé consiste en quatre lignes de vol de directions opposées avec un changement de la hauteur de vol pour décorrélérer le biais de portée du télémètre des paramètres du plan. Cette technique permet d'estimer les angles de visée avec une incertitude de 0.05° . Hebel and Stilla (2012) développent une méthode automatique de détection des plans permettant d'ajuster spontanément les angles de visée et les paramètres du plan. Seube and Keyetieu (2017) développent une méthode automatique d'ajustage des angles de visée d'un système sonar multi-faisceaux (SMF), inspirée de Skaloud and Schaer (2007) et de Hebel and Stilla (2012). L'innovation consiste à :

- une amélioration de la procédure de sélection des données en favorisant le découplage des angles de visée par critère de sensibilité ;
- une détermination d'un patron de lignes optimal ;
- un ajustage par moindres carrés de Deming pour trouver le meilleur plan en considérant l'ITC des points de sonde.

Ces méthodes sont toutes adaptées dans un contexte où le scanneur (lidar ou sonar) opère

verticalement. De plus, contrairement à ce cas de figure, le lidar mobile terrestre est souvent équipé de deux ou plusieurs scanners. La problématique devient alors plus grande et le nombre de paramètres se multiplie.

Dans le cas du SLM terrestre qui balaie latéralement, les effets géométriques des erreurs d'intégration s'observent sur des objets à la verticale comme des façades de bâtiments, des murs latéraux et des surfaces inclinées (e.g. toitures). Par conséquent, cette nouvelle configuration doit être prise en compte par la méthode d'ajustage et la séquence d'opérations. Barber et al. (2008) développent une méthode d'analyse des performances du SLM StreetMapper qui révèle une exactitude altimétrique de 3 cm et une exactitude planimétrique moindre de 10 cm. D'après les auteurs, ce manque de justesse est causé par un mésalignement des capteurs IMU-lidar. Rieger et al. (2010) de la compagnie Riegl GmbH développe une méthode (basée ICP : iterative closest point (Procházková and Martišek, 2018)) d'ajustage des angles de visée d'un scanner 3D avec un patron de lignes formé de deux passages de direction opposée et qui permet de découpler le roulis avec le tangage et le lacet. Cependant, aucun patron de lignes exact n'est défini pour les angles de tangage et lacet. Aucune faisabilité de la méthode en utilisant des scanners 2D (comme le VMX-250) n'a été démontrée jusque-là. Larouche (2012) adapte la méthode Skaloud et al., (2006) à des fins d'utilisation dans un contexte urbain pour l'ajustage semi-automatique de SLMs composés de 2 scanners 2D de la compagnie Trimble. Un site d'ajustage *in situ* (situé dans un quartier industriel) composé de plusieurs surfaces planes (verticales, horizontales et inclinées) donc de différentes orientations est utilisé pour estimer les angles de visée. Le patron de lignes utilisé correspond à deux trajectoires de direction opposée avec un virage perpendiculaire qui permet aussi de découpler le roulis et le lacet. Pour diversifier les cibles, Chan et al. (2013) développent une méthode d'ajustage des angles de visée pour le SLM TITAN composé de 4 scanners en utilisant plusieurs formes géométriques. En plus des surfaces planes, un modèle d'ajustage par moindres carrés basé sur des caténaïres (fils aériens) est ajouté pour décorréler les paramètres et améliorer la performance de la méthode d'ajustage. Un minimum de 6 passages est requis. Cependant les résultats obtenus pour les angles de tangage et de lacet sont loin d'être exacts comparés aux valeurs de référence. Sands (2017) développe une méthode d'ajustage des angles de visée basée sur deux cibles planaires rétroréfléchissantes éloignées de 100m. Le patron de lignes proposé est une trajectoire semi-arbitraire avec différentes courbes et des directions opposées. L'erreur d'angle de visée crée une ou plusieurs duplications du même plan qui sont ajustées par la suite pour en former un seul en estimant les trois angles de visée. Toutefois, un manque de répétabilité (écart de 0.06°) est noté pour le tangage estimé entre deux scénarios. He et al. (2013) et Hassan (2014) développent des méthodes d'ajustage d'un groupe de scanners en utilisant des scanners lidar comme référence, mais ces méthodes alourdissent le processus d'ajustement que l'on veut rendre simple et moins dispendieux. Par ailleurs, toutes ces méthodes supposent que les bras de levier IMU-lidar ont été déterminés préalablement et sont connus avec justesse. De plus, certaines de ces méthodes ne démontrent pas leur capacité à répéter les valeurs estimées des

paramètres d’ajustage à partir de différents jeux de données. Leslar et al. (2016) développent une méthode d’ajustage (somme vectorielle) simultanée des angles de visée et des bras de levier tout en effectuant un seul passage sur deux sites d’ajustage en zone urbaine. Aucune contrainte spécifique n’est imposée à la trajectoire du SLM. Chaque scénario réussit à produire une exactitude à la seconde d’arc pour les angles de visée et subcentimétrique pour les bras de levier. Le montage d’un site de validation permet de vérifier les résultats à partir de plusieurs cibles et les écarts obtenus en moyenne sont de 2 cm. Parmi les limitations de cette approche *in situ*, il est démontré que compte tenu des erreurs inhérentes au positionnement GNSS, la solution estimée a une exactitude moindre (Rieger, (2010) ; Larouche (2015) ; Seube, (2012)). Ces erreurs ont plus d’impact dans un contexte de canyon urbain et il est plus difficile de trouver des plans avec des orientations différentes, d’où la nécessité de recourir de préférence à un ajustage dénudé d’observations GNSS à partir d’étalon de travail en laboratoire dans un environnement doté d’outils de mesure de grande précision. Les valeurs des paramètres déterminés devraient ainsi servir de référence aux méthodes *in situ*.

Landry (2017) développe une nouvelle méthode d’ajustage au laboratoire de métrologie de l’Université Laval. Le SLM Trimble MX2 composé d’un seul scanneur 2D (single head) est utilisé comme instrument. La méthode consiste à remplacer la trajectoire du POS (habituellement déterminée par des observations GNSS bruitées de quelques centimètres) par une trajectoire déterminée par des mesures de distances prises à l’interféromètre permettant d’estimer le déplacement du SLM avec une exactitude sous la barre du millimètre. Ce déplacement s’effectue sur un banc de calibrage d’une longueur totale de 35 mètres. La variation de la position du SLM sur le banc de calibrage a permis de simuler une trajectoire en mode dynamique, normalement déterminée par des mesures de positionnement GNSS. Les observations du scanneur LiDAR, de la centrale inertielle ainsi que la distance mesurée par l’interféromètre ont été combinées pour former le nuage de points par géoréférencement direct, comme illustré à la figure (1.8). Le principe de cette méthode est de numériser des sphères dont les coordonnées des centroïdes sont connues à quelques millimètres près de manière à déterminer les angles de visée, les bras de levier et le biais de portée du scanneur. Ces cibles ont été levées par un scanneur 3D et l’enregistrement des scans a été fait dans un système local de coordonnées précis et défini en laboratoire (Larouche et al., 2018). Les exactitudes finales obtenues sont de l’ordre de 0.04° pour les angles de visée et de l’ordre de 0.4mm pour les bras de levier, ce qui est néanmoins nettement meilleur que les erreurs combinées pouvant être atteintes en utilisant la trajectoire GNSS (tableau 1.2). Par ailleurs, on peut noter que l’incertitude du lacet estimée est meilleure, nonobstant qu’une des faiblesses majeures des systèmes inertiels réside dans l’estimation de la composante du lacet, surtout dans un environnement intérieur. Dans ce mémoire, la méthode d’ajustage statique proposée est appliquée sur le même SLM qui a été utilisé par Landry (2017). Les résultats obtenus par celui-ci serviront de référence aux méthodes *in situ*, dont celle développée dans le présent mémoire.

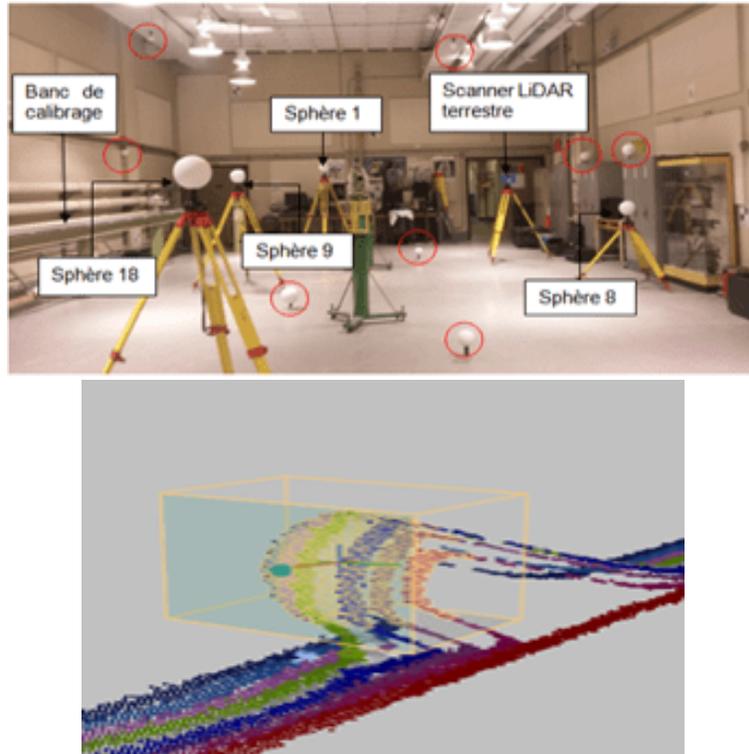


FIGURE 1.8 – En haut, montage du site de calibrage intérieur, en bas, nuage de points d’une sphère qui a servi de point d’appui.

TABLEAU 1.4 – Valeurs finales, des angles de visée et du biais de portée, déterminées par ajustage dynamique *in-lab*, Landry (2017)

Landry, 2016-05 Solution sans bras de levier	Roulis estimé (°)	Tangage estimé (°)	Lacet estimé (°)	Erreur de portée (m)
Valeur estimée	-0,368	-0,034	180,100	0,0482
Incertitude estimée (σ)	0,006	0,011	0,005	0,0003
Landry, 2016-12 Solution sans bras de levier	Roulis estimé (°)	Tangage estimé (°)	Lacet estimé (°)	Erreur de portée (m)
Valeur estimée	-0,255	0,045	180,069	0,0521
Incertitude estimée (σ)	0,004	0,009	0,003	0,0003

Ajustage d’un SLM en mode statique

Seube et al. (2012) développe une méthode pour estimer la latence totale d’un SLM en utilisant une table tournante pour générer des vitesses angulaires qui sont les facteurs des erreurs dynamiques. En effet, sur une table tournante, en appliquant une vitesse de rotation contrôlée sur le SLM balayant une sphère placée à une distance relativement courte, on peut quantifier le décalage Δx de position de son centre M' par rapport à sa position de référence M causée par une latence dt engendrée par un mouvement d’accélération autour de l’axe de lacet ψ , tel qu’illustré à la figure (1.9). En effectuant une rotation dans les deux directions opposées, le

centre de la sphère de référence se décale à gauche ou à droite. La latence s'estime à partir de la différence entre les deux centres de sphères perturbés par la rotation. La position du centre de la sphère a pu être détectée avec une résolution de 0.08mm, ce qui a permis d'estimer la latence du SLM utilisé lors de l'expérimentation avec une justesse inférieure à 0.1ms. Cette méthode a l'avantage de ne pas nécessiter de recours au positionnement. Toutefois, il faut que l'IMU soit mécaniquement couplée au lidar pour effectuer des manoeuvres de rotation contrôlée.

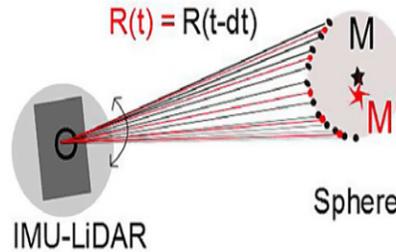


FIGURE 1.9 – Vue schématique de la méthode d'estimation de la latence totale d'un SLM au moyen d'une table tournante. Le centre M' de la sphère au temps de mesure t utilise l'orientation mesurée par l'IMU au temps $t+dt$.

La modélisation de la latence n'affecte pas la matrice de rotation contenant les angles de visée entre le scanneur et l'IMU C_{bS}^{bI} , mais plutôt la matrice de rotation contenant les angles d'Euler C_{bI}^n permettant de passer du repère local de l'IMU vers le repère de navigation. Par conséquent, on peut déduire que les erreurs systématiques de synchronisation peuvent être traitées distinctement de celles liées aux paramètres de montage des capteurs. Selon Skaloud (2006), dans le cas du ALS, pour répondre aux exigences de qualité, une incertitude aussi moindre que 0.1 milliseconde (ms) est nécessaire. Dans le cas du SLM terrestre, les distances étant plus courtes, les erreurs de cet ordre de grandeur sont moins critiques sur les jeux de données. Par conséquent, la latence peut être de l'ordre de quelques ms sans être détectable sur le nuage de points.

Le Scouarnec et al. (2013, 2014) ont développé une méthode d'ajustage en laboratoire pour pallier l'impact des erreurs de positionnement GNSS dues aux multitrajets et aux obstructions de signal et la difficulté de trouver des plans avec des orientations variables. La force de cette méthode réside dans l'utilisation d'une procédure basée sur l'orientation définie par les points d'une ligne de scan alors que les méthodes présentées jusque là sont basées sur les positions de ces points. Cela permet donc d'opter pour un calcul avec des paramètres d'entrée (observations) moins bruités, tels qu'illustrés à la figure (1.10). Donc, en plus d'éliminer les erreurs ponctuelles causées par le capteur GNSS, on isole aussi celles causées par l'IMU. La procédure de mesure consiste à monter les deux capteurs (lidar et IMU) sur une table

tournante de haute précision dont la vitesse angulaire de rotation est contrôlée. La mise en rotation de cette table permet de numériser la même surface plane (plafond par exemple) avec différents points de vue de façon à former différentes orientations des lignes de scan. Contrairement à la méthode d’ajustage des plans, on impose plutôt comme contrainte que les vecteurs directeurs des lignes de scan représentées à la figure (1.10) (image de droite) soient coplanaires.

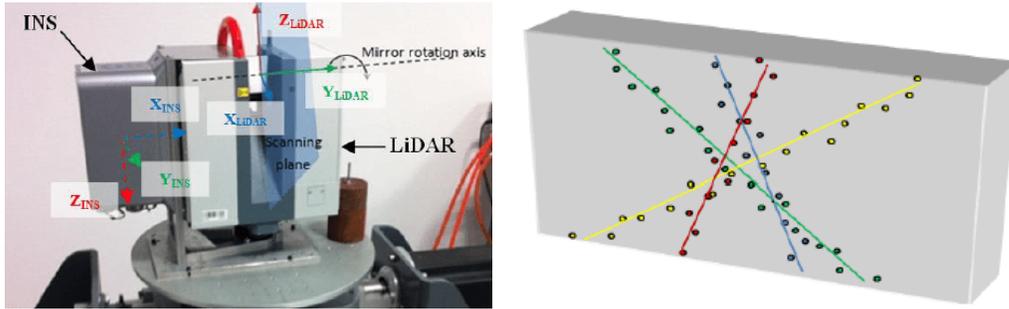


FIGURE 1.10 – À gauche, montage sur table tournante, à droite, lignes de scan versus nuage de points.

Connaissant les paramètres à estimer, soit la normale du plan scanné, les trois angles ϕ_b, θ_b et ψ_b obtenus par dérivation en chaîne de l’équation (1.1) et les paramètres observés (vecteurs directeurs des lignes de scan, roulis, tangage et lacet), on peut résoudre ce problème par l’approche statistique des moindres carrés. Les résultats obtenus par tests démontrent que l’on peut atteindre une précision de $0,03^\circ$ pour l’estimation des angles de visée. De plus, étant donné que l’acquisition des données est statique, cette méthode pourrait permettre de découpler aussi les bras de levier (a_{bI}) et la latence (dt_{LI}) sans transfert d’erreurs (corrélation) vis-à-vis des angles de visée. Cet aspect est une hypothèse qui sera vérifiée dans ce mémoire.

Dans ce mémoire, cette méthode d’ajustage des angles de visée est adaptée à un contexte de levé *in situ* en remplaçant la table tournante par un chariot équipé d’un cadre de montage qui permet de changer les attitudes du SLM, tel qu’illustré à la figure (1.11). Pour faire abstraction des défauts d’alignement de l’INS qui peuvent se propager dans la solution d’ajustage, une utilisation du SLM dans des conditions extérieures d’adaptation est appliquée, telle qu’illustré à la figure (1.5). Ces conditions normales d’usage tiennent compte de la nature de fonctionnement de l’INS discutée plus haut et de son grade.

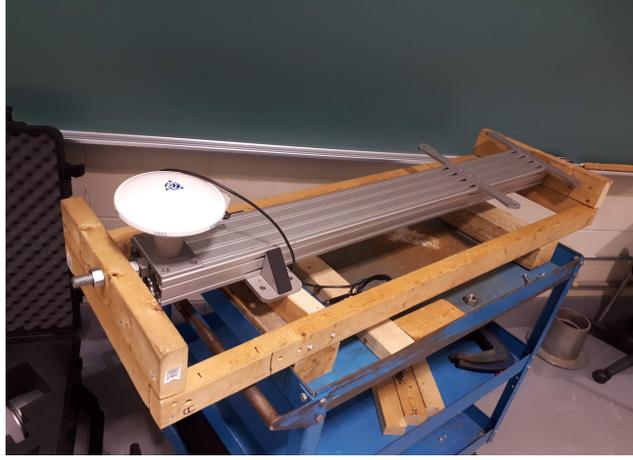


FIGURE 1.11 – Support de montage du SLM MX2 monté sur une structure mécanique portée par un charriot mobile. Ce montage permet d’exécuter la procédure de mesure pour l’ajustage des angles de visée et de la latence.

La détermination des paramètres inconnus se fait par une méthode de compensation par moindres carrés (Gauss - Markov). Elle consiste à modifier légèrement les observations décrites par un modèle de mesure pour éliminer les erreurs systématiques issues de la répétition des mesures (Cocard, 2017).

Le modèle fonctionnel de la compensation par approche générale (équation 1.4) est utilisé. Elle se rapporte à la démarche de compensation proposée par Le Scouarnec et al. (2013). Ce modèle est constitué par un nombre n_0 d’équations qui relient les valeurs vraies des u_0 inconnues \tilde{X} et celles des n observations \tilde{l} .

$$F(\tilde{l}, \tilde{X}) = 0 \quad (1.4)$$

$$\tilde{X} = \begin{bmatrix} \varphi_b \\ \theta_b \\ \psi_b \\ \nu_n \end{bmatrix}; \quad (1.5)$$

$$\tilde{l} = \begin{bmatrix} \varphi \\ \theta \\ \psi \\ v_{bL} \end{bmatrix}; \quad (1.6)$$

$\varphi_b; \theta_b; \psi_b$: sont les angles mesurés entre le repère du scanner et le repère de l'IMU par rapport au repère de celle-ci ;

$\varphi; \theta; \psi$: sont les angles mesurés entre le repère de l'IMU et le repère de navigation (matrice de changement de repère).

Pour ce modèle, on exige que les équations générales soient satisfaites pour les valeurs compensées des u_0 inconnues \hat{X} et celles des n observations \hat{l} . En notation matricielle, on obtient l'expression suivante :

$$F(\hat{l}, \hat{X}) = Ax + Bv + w = 0 \quad (1.7)$$

$A = \frac{\partial F}{\partial X}|_{(l, X_0)}$: est le jacobien des équations générales par rapport aux inconnues \tilde{X} ;

$B = \frac{\partial F}{\partial l}|_{(l, X_0)}$: est le jacobien des équations générales par rapport aux observations \tilde{l} ;

$w = F(l, X_0)$: est le vecteur des écarts de fermeture.

X_0 : le vecteur des valeurs approchées des paramètres inconnus.

Pour résoudre ce système, on calcule le système des équations normales :

$$\begin{aligned} N &= A^T M^{-1} A \\ n &= -A^T M^{-1} w \end{aligned} \quad (1.8)$$

Pour parvenir à une solution (équation 1.9), une contrainte minimale qui doit être satisfaite de façon stricte est introduite. Pour ce faire, une équation de condition sur les paramètres inconnus de la normale au plan v_n est introduite.

$$x = N^{-1}n \quad (1.9)$$

Dans le prochain chapitre, le cadre théorique de l'ajustage statique est d'abord présenté. La méthodologie qui permet d'élaborer des algorithmes de simulation et de générer un patron de lignes servant à caractériser les angles de visée et leur erreur sur les nuages de points sera ensuite discutée. Par la suite, la méthodologie utilisée pour estimer la latence et le biais de portée du scanner sera présentée. Finalement, des méthodes de validation et d'analyse des performances des résultats obtenus seront proposées.

Chapitre 2

Méthodologie de l’ajustage statique

La revue de littérature a permis de dégager une vue d’ensemble des principales sources d’erreurs auxquelles on veut s’attaquer pour minimiser les erreurs systématiques dans les observations du SLM afin d’améliorer la qualité et la justesse des nuages de points. Dans ce chapitre, la méthodologie de l’ajustage statique développée par (Le Scouarnec et al., 2013) est décrite de manière détaillée afin de comprendre par la suite, la contribution apportée par ce projet. Cette contribution porte sur la mise en place d’un patron de lignes qui permettra dans un premier temps d’élaborer un plan d’acquisition optimal adapté au SLM terrestre. Dans un deuxième temps, une validation de la méthode d’ajustage se fera à l’aide de données simulées pour faire une mise au point des facteurs pouvant influencer le résultat. Pour terminer, l’adaptation de la méthode sur un SLM commercial et l’acquisition de données réelles avec ce système permettront d’atteindre l’objectif final qui consiste à valider les résultats escomptés par ce projet.

2.1 Préparation des données à l’ajustage

En pratique, le support géodésique de la trajectoire finale du SLM n’est pas standardisé. La cause principale est reliée à la convention des axes de chaque capteur, le nombre d’angles de visée et la diversité des solutions disponibles pour faire de la cartographie lidar mobile.

Tel que mentionné au chapitre 1, la cartographie en temps réel à l’aide d’un SLM requiert le géoréférencement direct de chaque retour du scanneur r_{bS} dans un système de référence cartographique. Pour ce faire, des repères intermédiaires sont utilisés dans le modèle mathématique. Une revue pertinente de ces repères est présentée par (Seube, 2015; Legris et al., 2017). La description du système de coordonnées de chaque repère et en particulier des deux matrices de changement de coordonnées est présentée dans la section suivante.

2.1.1 Présentation des repères intermédiaires associés aux SLMs

Le tableau (2.1) présente une liste des repères les plus couramment utilisés. Ces repères sont des systèmes orthonormés directs. On distingue notamment :

- le système ENU (East - North - Up) : l'axe X vers l'est, l'axe Y vers le nord et l'axe Z vers le haut ;
- le système NED (North - East - Down) : l'axe X vers le nord, l'axe Y vers l'est et l'axe Z vers le bas ;
- le système NWU (North - West - Up) : l'axe X vers le nord, l'axe Y vers l'ouest et l'axe Z vers le haut.

TABLEAU 2.1 – Repères d'un SLM

ID	Description
bS (body Scanner)	repère du scanneur : défini par les trois principaux axes x_{bS}, y_{bS}, z_{bS}
bI (body IMU)	repère de l'INS : défini par la triade d'accéléromètres x_{bI}, y_{bI}, z_{bI}
n (navigation)	repère de navigation : défini par le nord géographique (N)
LGF (Local Geodetic Frame)	repère local géodésique : défini par la direction verticale ellipsoïdique
LAF (Local Astronomic Frame)	repère local astronomique : défini par la direction verticale astronomique
TRF (Terrestrial Reference Frame)	repère terrestre géocentrique fixe, exemple NAD83 (llh)
b (body frame)	repère corps de la plateforme
p (projection in mapping frame)	repère cartographique : défini par le système de projection national, exemple UTM (ENU)

Le repère du scanneur

Les observations d'angles et de distances du scanneur sont coordonnées dans son repère local noté par $(bS) = (X_{bS}, Y_{bS}, Z_{bS})$. L'origine du repère est au centre optique du lidar ou sur l'axe de rotation du miroir. Soit γ l'angle entre l'axe Y_{bS} et un faisceau laser. Dans ce repère (NED), chaque retour du faisceau laser détecté est exprimé par le cosinus directeur :

$$r_{bS} = \rho \begin{bmatrix} 0 \\ \cos \gamma \\ \sin \gamma \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

ρ est la distance mesurée par le lidar ;

γ est l'angle de dépointage d'un faisceau laser. La valeur de celui-ci doit être cohérente avec la convention de l'axe de roulis φ . À la figure (2.1) le roulis est positif lorsque l'axe tribord s'enfonce. $\gamma = 0$ correspond à l'horizontale et $\gamma = \pi/2$ correspond à la verticale. Nous utiliserons α comme angle de tir lidar qui équivaut à $:90^\circ - \gamma$.

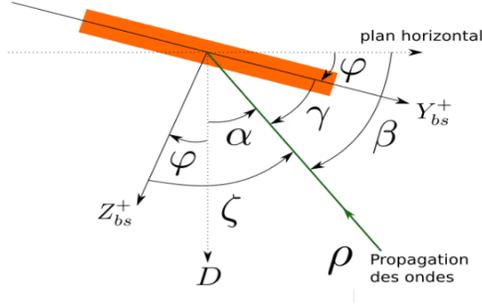


FIGURE 2.1 – Convention NED du repère bs (Legris et al., 2017).

Le repère de l'INS

La convention NED est utilisée pour définir le repère corps de la centrale d'attitude. Il s'agit d'un repère cartésien de la main droite dont l'origine est située au centre de mesure de l'IMU. Les trois angles d'Euler sont utilisés pour estimer les positions et les orientations du SLM lors de la navigation. En dénotant par (φ, θ, ψ) les trois angles d'Euler liés respectivement par X_{bI} , Y_{bI} et Z_{bI} les axes de ce repère, on obtient les matrices de transformation suivantes :

$$C_1(\psi) = R_1(-\psi) = \begin{pmatrix} \cos(\psi) & \sin(\psi) & 0 \\ -\sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

$$C_2(\theta) = R_2(-\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

$$C_3(\varphi) = R_3(-\varphi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varphi) & \sin(\varphi) \\ 0 & -\sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

où C signifie coordonnée. Le repère tourne d'où l'appellation de transformation. La matrice de rotation équivalente à la matrice de transformation C est notée R (Seube, 2015).

Le repère de navigation (n)

Ce repère est défini comme suit :

- L'axe X est orienté vers le Nord géographique (N) ;
- L'axe Y vers l'est (E) ;
- L'axe Z suivant la normale à l'ellipsoïde (D).

Les axes X et Y appartiennent au plan tangent à l'ellipsoïde au point d'intérêt dénoté S à la figure (2.3). L'origine de ce repère est la projection de la position du SLM sur l'ellipsoïde de référence. Cette position est donnée par l'antenne GNSS.

LAF est le repère local astronomique (N, E, Da), dont Da est la direction de la verticale astronomique, et LGF est le repère local géodésique (N, E, De), dont De est orienté vers la normale à l'ellipsoïde sont des repères notés (n). Le repère local géodésique est utilisé pour définir les orientations de la plateforme du SLM en accord avec le repère inertiel. En théorie, les mesures d'attitude de l'IMU devraient représenter l'orientation du SLM par rapport au LAF. Compte tenu de la performance des IMUs utilisés (MEMS, grade tactique), on ne peut pas évaluer les déviations de la verticale entre le LAF et le LGF. En pratique, on admet que les mesures d'attitude de l'IMU représentent son orientation par rapport au LGF. Le LGF et le LAF sont des repères topocentriques (figure 2.2).

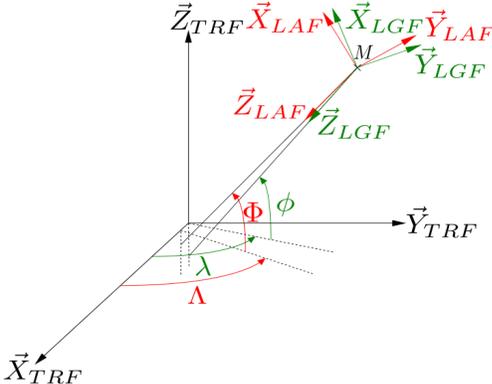


FIGURE 2.2 – LGF vs LAF. ϕ et λ représentent la latitude et la longitude géodésiques. Φ et Λ représentent la latitude et la longitude astronomiques.

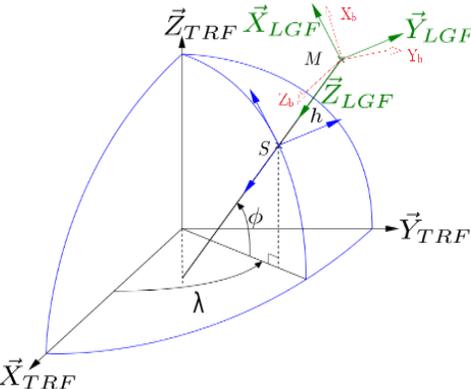


FIGURE 2.3 – Référentiel géodésique local d'un SLM.

Le repère corps b

Il s'agit d'un repère qui est lié à la plateforme du SLM (qui dépend du type d'intégration). Ce repère joue un rôle lors de l'alignement fin et du levé en mode dynamique. Il définit aussi les axes de la plateforme de levé dans lequel les mesures de bras de levier sont usuellement déterminées. Tel qu'illustré à la figure (2.4), lorsqu'il est orienté (NED) on peut le définir comme suit :

- L'axe x_b est orienté vers la direction longitudinale, vers l'avant ;
- L'axe y_b la direction transversale, vers la droite (tribord) ;
- L'axe z_b vers le bas.

Lorsqu'il est orienté (ENU) on peut le définir comme suit :

- L'axe x_b est orienté vers la direction longitudinale, vers l'avant ;
- L'axe y_b vers la gauche (bâbord) ;
- L'axe z_b vers le haut.

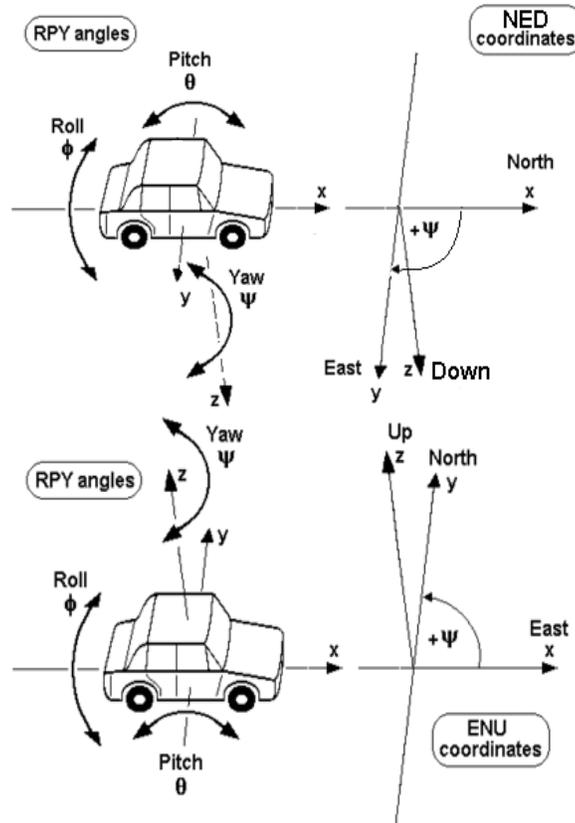


FIGURE 2.4 – Convention NED vs ENU du repère corps b .

Le repère TRF

Le système de référence terrestre (TRF : Terrestrial Reference Frame) est défini par la figure (2.5). Dans ce système non inertiel dont l'origine est le centre de la Terre, les axes suivants sont définis :

- L'axe Z prend la direction du pôle ;
- L'axe X correspond à l'intersection entre la direction du premier méridien et le plan équatorial ;
- L'axe Y complète le repère orthogonal de la main droite.

Le WGS84 et le NAD83 sont des réalisations du TRF. Ces datums sont géocentriques et leur système de coordonnées peuvent être définis par :

- Les coordonnées cartésiennes : XYZ ;
- Les coordonnées géodésiques : latitude ϕ , longitude λ et hauteur h (llh).

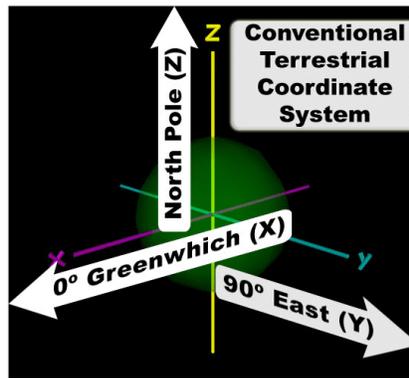


FIGURE 2.5 – Référentiel terrestre (TRF)

Le repère cartographique

Pour représenter le nuage de points par rapport à un système de coordonnées planes, les projections conformes UTM et MTM (SCOPQ au Québec) sont utilisées en pratique. Ces projections se caractérisent par un facteur d'échelle et une convergence des méridiens. Les routines utilisées pour transformer les coordonnées de la projection vers les coordonnées dans le système TRF seront présentées dans le chapitre 3 (traitements des données lidar). Cependant, pour éviter les distorsions (forme, surface, distance, direction) causées par ce type de représentation, les observations utilisées pour la méthode d'ajustement le seront par rapport au référentiel LGF.

2.1.2 Transformation des coordonnées

La matrice de cosinus directeur qui opère la transformation du repère (a) vers le repère (b) est notée par C_a^b . La matrice C est appelée une matrice de transformation. Il s'agit d'une matrice

orthogonale directe dont les colonnes forment une base orthonormée directe et sa matrice inverse équivaut à sa matrice transposée : $C_b^a = (C_a^b)^{-1} = (C_a^b)^T$.

Pour obtenir des points géoréférencés, il est nécessaire de transformer dans un premier temps les retours lidar dans le repère de l'IMU. La transformation d'un vecteur de bS vers bI peut se faire par le produit d'une série de trois matrices de rotation R_1 , R_2 et R_3 . Le passage du repère de l'IMU au repère de navigation se fait de la même façon.

$$C_{bS}^{bI} = R_1(\psi_b)R_2(\theta_b)R_3(\varphi_b) \quad (2.5)$$

$$C_{bI}^n = R_1(\psi)R_2(\theta)R_3(\varphi) \quad (2.6)$$

En considérant le repère LGF comme étant le repère n orienté selon le (NED), notons par φ , θ , ψ les angles d'Euler et x_b , y_b , z_b , les trois axes du repère b tels que définis à la figure (2.4). La convention de signe suivante sera appliquée :

- $x_b \geq 0$: avant
- $y_b \geq 0$: tribord
- $z_b \geq 0$: bas
- $\varphi \geq 0$: roulis, tribord s'enfonce
- $\theta \geq 0$: tangage, l'avant pointe vers le haut
- $\psi \geq 0$: on tourne à droite

La transformation du repère n(LGF) vers le repère b ou bI se fera comme suit :

1. La transformation autour de l'axe D, notée C_1 , permet d'aligner l'axe N avec la projection de x_b projeté sur le plan (Nord, Est) ;
2. La transformation autour de l'axe E', notée C_2 , permet d'aligner l'axe N'' avec l'axe x_b ;
3. La transformation autour de l'axe N'', notée C_3 , permet d'aligner E'' et D'' respectivement avec y_b et z_b .

Cette série de transformations est décrite par la matrice suivante :

$$C_n^b = C_3(\varphi)C_2(\theta)C_1(\psi) \quad (2.7)$$

$$C_n^b = \begin{pmatrix} \cos \psi \cos \theta & \sin \psi \cos \theta & -\sin \theta \\ (\cos \psi \sin \theta \sin \varphi - \sin \psi \cos \varphi) & (\sin \psi \sin \theta \sin \varphi + \cos \psi \cos \varphi) & \cos \theta \sin \varphi \\ (\cos \psi \sin \theta \cos \varphi + \sin \psi \sin \varphi) & (\sin \psi \sin \theta \cos \varphi - \cos \psi \sin \varphi) & \cos \theta \cos \varphi \end{pmatrix}$$

La transformation du repère b vers le repère LGF(n) se fera comme suit :

$$\begin{aligned}
C_b^n &= (C_3(\varphi)C_2(\theta)C_1(\psi))^T \\
&= C_1(-\psi)C_2(-\theta)C_3(-\varphi) \\
&= R_1(\psi)R_2(\theta)R_3(\varphi)
\end{aligned} \tag{2.8}$$

$$C_b^n = \begin{pmatrix} \cos \psi \cos \theta & (\cos \psi \sin \theta \sin \varphi - \sin \psi \cos \varphi) & (\cos \psi \sin \theta \cos \varphi + \sin \psi \sin \varphi) \\ \sin \psi \cos \theta & (\sin \psi \sin \theta \sin \varphi + \cos \psi \cos \varphi) & (\sin \psi \sin \theta \cos \varphi - \cos \psi \sin \varphi) \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \varphi & \cos \theta \cos \varphi \end{pmatrix}$$

Le passage du repère n (LGF) vers le repère TRF, figure (2.3), s'opère en deux étapes de transformation :

1. Une transformation $(\phi + \pi/2)$ autour de l'axe topocentrique E, représentée par la matrice :

$$C_{(\phi+\pi/2)} = \begin{pmatrix} -\sin \phi & 0 & -\cos \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos \phi & 0 & -\sin \phi \end{pmatrix}$$

2. Une transformation $-\lambda$ autour de l'axe topocentrique D, représentée par la matrice :

$$C_\lambda = \begin{pmatrix} \cos \lambda & -\sin \lambda & 0 \\ \sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Cette série de transformations sera notée par C_{LGF}^{TRF} :

$$C_n^{TRF} = C_\lambda C_{(\phi+\pi/2)} = \begin{pmatrix} -\sin \phi \cos \lambda & -\sin \lambda & -\cos \phi \cos \lambda \\ -\sin \phi \sin \lambda & \cos \lambda & -\cos \phi \sin \lambda \\ \cos \phi & 0 & -\sin \phi \end{pmatrix} \tag{2.9}$$

La transformation inverse se fait par transposition. Soit G , l'origine du repère LGF, notons $OG_{TRF} = (x_G, y_G, z_G)$ sa coordonnée dans le repère TRF. Soit M , un point de coordonnées (E, N, h) par rapport au repère LGF. La transformation de M vers TRF est décrite :

$$OM_{TRF} = OG_{TRF} + C_n^{TRF} \cdot GM_{LGF}$$

M représente le point X_n ; OG_{TRF} représente le point P_n du SLM en TRF exprimé par les coordonnées géodésiques (λ_G, ϕ_G, h_G) :

$$\begin{pmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{pmatrix}_{TRF} = \begin{pmatrix} (N+h) \cos \phi \cos \lambda \\ (N+h) \cos \phi \sin \lambda \\ (N(1-e^2)+h) \sin \phi \end{pmatrix}_{TRF} \quad (2.10)$$

- N est le rayon de courbure de l'ellipsoïde donnée par : $a/\sqrt{1-e^2 \sin^2(\phi)}$,
- h est la hauteur ellipsoïdale,
- e est l'excentricité de l'ellipsoïde,
- ϕ est la latitude géodésique,
- λ est la longitude géodésique.

2.2 Ajustage des angles de visée d'un SLM sans positionnement et sans latence

2.2.1 Théorie sous-jacente de l'ajustage statique

Les observations d'un SLM sont affectées d'erreurs dont les principales sources sont réparties parmi les facteurs de limitation du système d'orientation et de position (POS), les erreurs systématiques de mesure de distances du scanneur et les erreurs d'ajustage (Schenk et al., 2001). Les erreurs d'ajustage sont liées à l'intégration temporelle et mécanique des capteurs et sont traitées en trois grandes catégories, soit :

- les angles de visée qui sont des angles de déflexion entre le repère du scanneur et le repère de la centrale d'attitude IMU ;
- les bras de levier entre le capteur de position et le centre optique du scanneur ;
- le défaut de synchronisation temporelle lidar-IMU et lidar-POS.

Pour la plupart des systèmes lidar mobiles, l'unité de mesure inertielle est rigidement assemblée au scanneur telle que montrée à la figure (2.6). En effet, ce type d'intégration mécanique a comme avantage de permettre une procédure d'ajustage indépendante de la plateforme qui sert uniquement de moyen de transport, et minimise, de surcroît, les bras de levier.

Notons que la position d'un retour du scanneur dans le système de référence géocentrique terrestre (TRF) défini à la figure (2.5), correspond à :

$$X_{TRF} = P_{TRF} + C_{LGF}^{TRF} C_{LAF}^{LGF} C_{bI}^{LAF} (C_{bI}^{bI} C_{bS}^{bI*} r_{bS} + a_{bI}) \quad (2.11)$$

dont

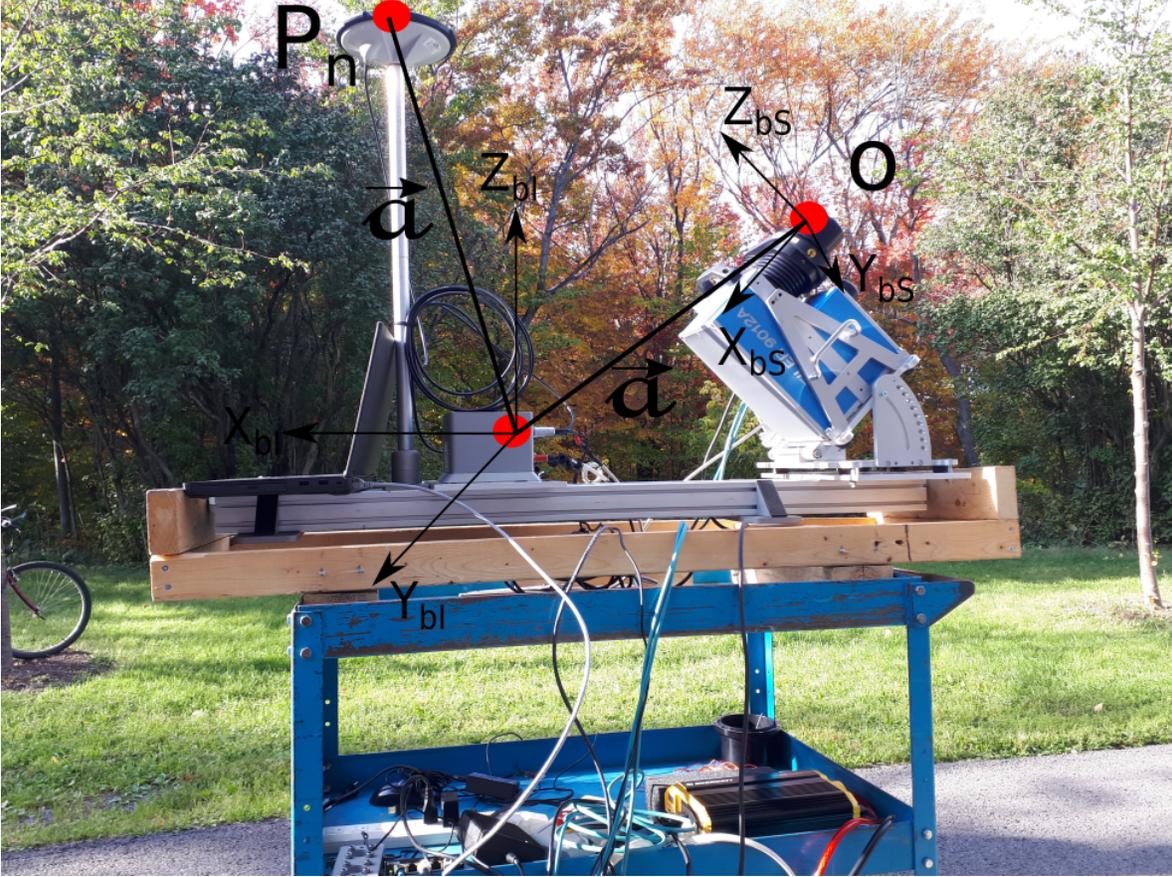


FIGURE 2.6 – Système lidar mobile terrestre. L’IMU, le scanneur et l’antenne GNSS sont fixés sur un support commun, ce qui simplifie la mobilisation de l’équipement, minimise les bras de levier et permet une utilisation indépendante de la charge utile vis-à-vis de la plateforme de transport.

- P_{TRF} est la position du PRP(peut correspondre au centre de mesure de l’IMU) ;
- a_{bI} est le bras de levier entre la position du centre de mesure de l’IMU et le centre optique du lidar ;
- (bI) est le repère anticipé de l’IMU, (bI^*) est son repère assumé en fonction d’un défaut d’alignement.

Dans la suite, on suppose que le (LAF) correspond au (LGF) et que ces deux repères seront dénotés par (n) , communément appelé le repère de navigation. Le modèle mathématique de géoréférencement direct dans le repère de navigation devient alors :

$$X_n = P_n + C_{bI}^n (C_{bI^*}^{bI} C_{bS}^{bI^*} r_{bS} + a_{bI}) \quad (2.12)$$

Partant de (2.12), on peut remarquer que la matrice de rotation des angles de visée $C_{bI^*}^{bI}$ de même que le vecteur des bras de levier a_{bI} peuvent induire directement des erreurs systéma-

tiques dans le jeu de données géoréférencé.

$$C_{bS}^{bI} = C_{bI^*}^{bI} C_{bS}^{bI^*} \quad (2.13)$$

C_{bS}^{bI} : Valeur vraie de l'orientation relative IMU-lidar ;

$C_{bS}^{bI^*}$: Valeur approchée de l'orientation relative IMU-lidar (offset angulaire).

Une approche courante de l'ajustage des angles de visée $C_{bI^*}^{bI}$ consiste à construire des approximations locales de surfaces en utilisant des points géoréférencés, et à ajuster les normales à ces surfaces à partir de plusieurs points de vue.

2.2.2 Principe et intérêt de l'ajustage en mode statique

Le principe de l'ajustage statique consiste en l'utilisation directe des observations r_{bS} du scanner qui forment des lignes de scans acquises sur une ou plusieurs surfaces planes à partir de différentes stations statiques. Il s'agit donc de recueillir une série de prises de vues différentes, correspondant à des mesures d'angles, de distances et d'azimuts par rapport à une surface plane en se servant uniquement du scanner et de la centrale d'attitude (IMU). Cette méthode est donc une alternative aux méthodes d'ajustage précitées qui utilisent des points géolocalisés lorsqu'on travaille directement avec des lignes statiques produites par le scanner (figure 2.7).

Pour chaque station statique de capture (le SLM demeure immobile), l'observation recueillie est une série de retours lidar qui forment une ligne de scan dont le vecteur directeur (orientation obtenue par ajustement 3D des retours) est noté v_n^i , dans le repère de navigation. Pour chaque ligne de scan (i), le vecteur v_n^i associé est orthogonal à la normale de la surface plane, si et seulement si, la matrice de cosinus directeur des angles de visée est connue sans erreur. L'incertitude ou le manque de connaissances de ces valeurs d'orientation a pour conséquence que l'orientation de la ligne de scan n'est pas parallèle au plan scanné.

Pour une station statique d'acquisition indexée i , on considère l'équation générale suivante :

$$f_i(\varphi_b, \theta_b, \psi_b, \nu_n) := \left\langle v_n^i, \nu_n \right\rangle = \left\langle C_{bI}^m C_{bI^*}^{bI} C_{bS}^{bI^*} v_{bL}^i, \nu_n \right\rangle = 0 \quad (2.14)$$

Les paramètres inconnus sont le vecteur normal à la surface plane ν_n et les angles de visée $(\varphi_b, \theta_b, \psi_b)$ qui permettent de définir la matrice de rotation des angles de visée $C_{bI^*}^{bI} = R_1(\psi_b)R_2(\theta_b)R_3(\varphi_b)$.

Ceci dit, l'équation d'observations basée sur l'orientation d'un semi de points lidar au lieu d'utiliser individuellement chacun de ces points se décrit par la formule (2.14). De plus, en

utilisant une approche numérique dans l'espace vectoriel, on remarque que l'équation d'observations ne nécessite aucune connaissance de la position du scanneur, et de surcroît des points géoréférencés.

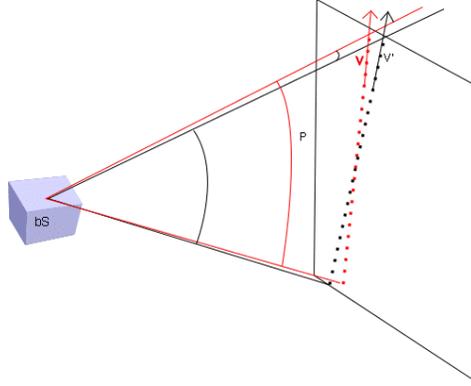


FIGURE 2.7 – Ligne de scan statique sur une surface plane. Le vecteur directeur v_{bL} est obtenu par ajustement des observations brutes dans le repère local du scanneur. Dans le repère de navigation, on peut distinguer l'orientation attendue $v_n = C_{bI}^n C_{bI^*}^{bI} C_{bS}^{bI^*} v_{bL}$, qui nécessite la connaissance de la matrice de cosinus directeur des angles de visée, de l'orientation observée $v'_n = C_{bI}^n C_{bS}^{bI^*} v_{bL}$ qui ignore cette matrice.

Notons :

- ν_n le vecteur normal au plan, exprimé dans le repère de navigation ;
- v_{bL} , l'orientation de la ligne de scan, obtenu par ajustement de droite 3D des retours lidar dans le repère (bS).

Les observations du modèle fonctionnel d'ajustement sont définies par un trio formé du vecteur directeur de la ligne de scan de chaque station v_{bL}^i , des orientations approximatives $C_{bS}^{bI^*}$ et de la matrice de rotation C_{bI}^n . Celle-ci est calculée par l'IMU qui enregistre les attitudes en mode statique. Les vecteurs v_{bL}^i sont obtenus par ajustement des points 3D d'une ligne de balayage coordonnée dans le repère local du scanneur et dont on peut estimer les paramètres en calculant la matrice de variance covariance. La méthode d'ajustement de droite utilisée sera présentée au chapitre 3. La normale au plan est initialisée en calculant le produit vectoriel de deux vecteurs directeurs v_{bL}^i choisis aléatoirement. Cela permet d'accélérer la convergence de l'algorithme. Cependant, il faudrait que ces deux vecteurs soient non colinéaires et coplanaires (2.8).

On obtient ainsi :

$$\nu_n = v_n^i \times v_n^j \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} v_n^i &= C_{bI}^n v_{bL}^i ; \\ v_n^j &= C_{bI}^n v_{bL}^j . \end{aligned}$$

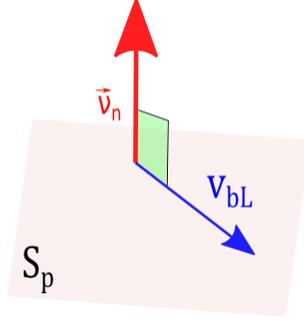


FIGURE 2.8 – Le vecteur directeur v_{bL} de la ligne de scan et la normale au plan d’ajustage ν_n .

Soulignons que la matrice des angles de visée C_{bL}^{bl} n’est pas prise en compte dans le calcul d’initialisation de la normale ν_n , car celle-ci n’est pas encore estimée. La valeur obtenue à cette étape est normalisée et ne sert que d’une approximation pour les coordonnées sphériques α et β .

2.2.3 Estimation numérique des angles de visée d’un SLM

Cette sous-section décrit la méthode d’ajustage proposée par Le Scouarnec et al. (2013).

Dans le but de propager la contribution statistique de chaque observation pour obtenir la meilleure précision possible pour les paramètres inconnus, une approche itérative de compensation par moindres carrés est préconisée. Dans le but d’éviter la présence de contraintes dans la solution pour le vecteur normal ν_n (soit : $G(\nu_n) = \nu_n^T \nu_n - 1 = 0$) et d’éviter une surparamétrisation, le vecteur normal à une surface plane verticale sera décomposé en une paire d’angles. α représente un azimut et β représente un angle zénithal. Le calcul du vecteur normal ν_n se fait comme suit :

$$\nu_n = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \alpha \\ \cos \beta \sin \alpha \\ \sin \beta \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Autrement dit, on suppose que la norme du vecteur normal au plan sera égale à 1 ($\|\nu_n\| = 1$). La figure (2.9) illustre l’influence de ces deux variables sur l’angle de tir lidar.

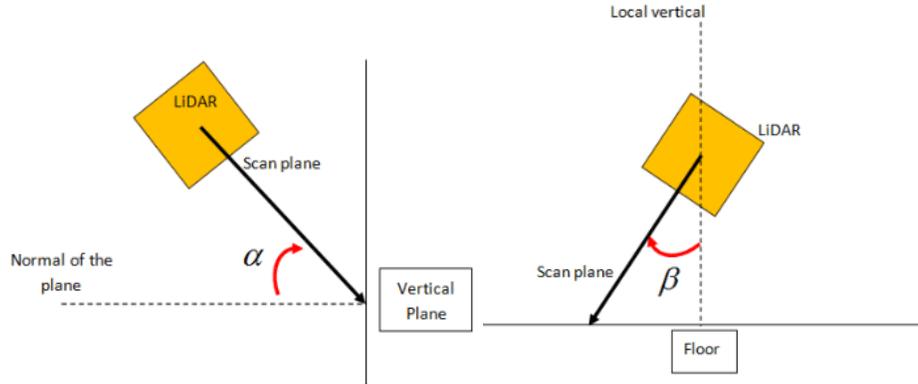


FIGURE 2.9 – À gauche, vue de dessus d’un plan vertical, α représente l’angle de tir par rapport à ν_n entre $0/180^\circ$. À droite, vue de face d’un plan horizontal, β représente l’angle de tir par rapport à ν_n entre $0/90^\circ$ (LeScouarnec et al., 2013)

Définition du modèle fonctionnel

Le vecteur des paramètres inconnus est $X = (\varphi_b, \theta_b, \psi_b, \alpha, \beta)$, et on note par X_0 les valeurs approchées de X . Alors f est une fonction non linéaire en X . En linéarisant l’équation (2.14), on obtient :

$$\begin{aligned} f(X) &= f(X_0) + \frac{\partial f(X_0)}{\partial X}(X - X_0) \\ &= f(X_0) + \frac{\partial f(X_0)}{\partial X}(\delta X) \end{aligned} \quad (2.17)$$

avec $X = X_0 + \delta X$.

$\frac{\partial f}{\partial X}$ est la matrice jacobienne de la fonction f . Comme l’objectif est de trouver X de manière à avoir $f_i(X_i) = 0$, alors l’équation (2.17) devient :

$$\frac{\partial f(X_0)}{\partial X}(\delta X) = -f(X_0) \quad (2.18)$$

Notons par $A = \frac{\partial f(X_0)}{\partial X}$ la matrice des coefficients, $w = -f(X_0)$ le vecteur de fermeture de l’équation d’observations, N_{LS} et n_{LS} le système des équations normales (n équations à u inconnues = 5). Le problème peut donc être résolu par moindres carrés itératifs définis par l’équation (2.19).

$$N_{LS} \delta X = n_{LS} \quad (2.19)$$

1. La matrice C_{bS}^{bI} ne se linéarise pas $C_{bS}^{bI} \approx I + C_{bS}^{bI}$. L’optimisation non linéaire permet des gains de précision non négligeable.

La solution à ce problème est la suivante :

$$\delta X = (A^T P A)^{-1} A^T P w \quad (2.20)$$

Ici, A est une matrice de taille $n * u$ avec n le nombre total de stations statiques utilisées pour l'estimation. Il est nécessaire d'avoir $n \geq u$. P est la matrice de covariances des équations générales. La matrice A prend la forme suivante :

$$\frac{\partial f_i(X_0)}{\partial X} = \left(\begin{array}{c} \left\langle (C_{bI}^n)^i R_1(\psi_b) R_2(\theta_b) \frac{\partial R_3(\varphi_b)}{\partial \varphi_b} C_{bS}^{bI*} v_{bL}^i, \nu_n \right\rangle \\ \left\langle (C_{bI}^n)^i R_1(\psi_b) \frac{\partial R_2(\theta_b)}{\partial \theta_b} R_3(\varphi_b) C_{bS}^{bI*} v_{bL}^i, \nu_n \right\rangle \\ \left\langle (C_{bI}^n)^i \frac{\partial R_1(\psi_b)}{\partial \psi_b} R_2(\theta_b) R_3(\varphi_b) C_{bS}^{bI*} v_{bL}^i, \nu_n \right\rangle \\ \left\langle (C_{bI}^n)^i R_1(\psi_b) R_2(\theta_b) R_3(\varphi_b) C_{bS}^{bI*} v_{bL}^i, \frac{\partial \nu_n}{\partial \alpha} \right\rangle \\ \left\langle (C_{bI}^n)^i R_1(\psi_b) R_2(\theta_b) R_3(\varphi_b) C_{bS}^{bI*} v_{bL}^i, \frac{\partial \nu_n}{\partial \beta} \right\rangle \end{array} \right)^T \quad (2.21)$$

Pour une série de stations d'ajustage statique $i = 1 \dots n$ couplée à des valeurs approchées X_0 , les équations générales peuvent s'écrire de la façon suivante (chaque ligne de dimension (1×5) étant calculée à partir des données issues d'une station d'observations spécifique) :

$$\left(\begin{array}{c} \frac{\partial f_1}{\partial X}(X_0) \\ \frac{\partial f_2}{\partial X}(X_0) \\ \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial X}(X_0) \end{array} \right) \delta X = - \left(\begin{array}{c} f_1(X_0) \\ f_2(X_0) \\ \vdots \\ f_n(X_0) \end{array} \right) \quad (2.22)$$

dont la solution fournit un estimé des paramètres inconnus δX . Il est donc possible d'implanter un processus itératif par variation des paramètres en initialisant les valeurs approchées qui sont les angles de visée a priori entre le lidar et l'IMU et le vecteur normal au plan d'ajustage. Le modèle stochastique quant à lui est défini à partir des variances résiduelles obtenues suite à l'ajustement vectoriel des lignes de scans v_{bL}^i et des variances des angles d'attitude du SLM.

Calcul de la matrice de poids P

La matrice P est l'inverse de la matrice de variance covariance associée aux équations $-f(X_0)$. Elle est obtenue par le principe de propagation d'erreurs. En partant de (2.14), on peut écrire :

$$f(X) = g(\varphi, \theta, \psi, v_{bL}) = g(\eta) \quad (2.23)$$

avec

$$\eta = (\varphi, \theta, \psi, v_{bL})$$

Connaissant les variances associées à :

- $C_{bI}^n : \sigma_\varphi^2, \sigma_\theta^2, \sigma_\psi^2 ;$
- $v_{bL} : \sigma_{v1}^2, \sigma_{v2}^2, \sigma_{v3}^2.$

La matrice de variance covariance associée à $-f(X_0)$ est :

$$\Sigma_{f(X)} = \frac{\partial g(\eta)}{\partial \eta} \Sigma^{-1}(\varphi, \theta, \psi, v1, v2, v3) \frac{\partial g(\eta)^T}{\partial \eta} \quad (2.24)$$

$\frac{\partial g(\eta)}{\partial \eta}$: est la jacobienne de la fonction g, et $\Sigma(\varphi, \theta, \psi, v1, v2, v3)$ est la matrice de variance covariance associée à η . Le facteur de variance a priori σ_0^2 est unitaire. Finalement on obtient :

$$P = (\Sigma_{f(X_0)})^{-1} \quad (2.25)$$

Les angles d'attitudes (roulis, tangage, lacet) pour un vrai levé sont fortement corrélés. Il serait idéal de considérer les covariances entre ces angles obtenus par propagation d'erreurs. Dans l'approche proposée, les covariances entre ces angles sont nulles et la matrice Σ est diagonale.

Estimation des paramètres

Le vecteur $\delta(X)$ est de dimension 5×1 . Il est composé des angles de visée et des coordonnées sphériques de la normale au plan.

$$\hat{X} = X_0(\varphi_b^0, \theta_b^0, \psi_b^0, \alpha_b^0, \beta_b^0) + \delta X(\varphi_b, \theta_b, \psi_b, \alpha, \beta) \quad (2.26)$$

Le but est d'estimer les angles de visée avec une incertitude de l'ordre de 0,01 degré, ce qui correspond à 36 secondes d'arc. L'itération ne porte que sur les inconnues X, car la qualité du point d'expansion pour les observations est suffisamment proche des valeurs compensées. Pour arrêter le processus itératif, on définit un critère d'arrêt lorsque la plus grande valeur singulière de δX est inférieure à 0.0001 radian (20") et que l'écart de valeur entre deux itérations successives est inférieure à 0.001 radian (3'). Le nombre d'itérations maximum devrait tourner autour de 4, ce qui indique une convergence des écarts vers ce critère. Au-delà de ce nombre d'itérations, la solution diverge et il est probable que le vecteur de fermeture w ne tend pas vers les résidus v, causant un résultat aberrant ou imprécis.

Analyse statistique

Tels que définis par le modèle mathématique, les inconnues et les résidus sont répartis selon une distribution gaussienne. On peut donc écrire :

$$\hat{X} \sim \mathcal{N}(X_0, S_0^2 N_{LS}^{-1}) \quad (2.27)$$

- \hat{X} : valeurs vraies,
- X_0 : valeurs approchées.

$$\hat{v} \sim \mathcal{N}(0, S_0^2 (P^{-1} - A N_{LS}^{-1} A^T)) \quad (2.28)$$

Une fois les inconnues estimées, il faut effectuer une analyse statistique afin de déterminer la qualité du résultat. Lorsque la méthode d'ajustage converge, on calcule la matrice des résidus comme suit :

$$v = w - A \delta X \quad (2.29)$$

v est un vecteur de dimension n qui correspond au nombre de lignes de scan utilisées. La détermination des incertitudes des angles de visée dépend du modèle stochastique. En calculant le facteur de variance a posteriori S_0^2 qui est un estimateur non biaisé de σ_0^2 , on peut le soumettre à un test du χ^2 pour vérifier sa compatibilité avec celui-ci.

$$S_0^2 = \frac{v^T P v}{n - u} \quad (2.30)$$

Le test sur le facteur S_0^2 passe lorsque $v^T P v (S_0^2 (n - u))$ est compris entre :

$$\lambda_1 \leq v^T P v \leq \lambda_2 \quad (2.31)$$

λ_1 et λ_2 sont obtenus de la table inverse de la distribution du χ_{n-u}^2

Lorsque l'équation 2.31 est satisfaite, on obtient la matrice de variance covariance des paramètres ajustés $\Sigma_{\delta X}$ et la matrice de variance covariance des résidus Σ_{vv} :

$$\Sigma_{\delta X} = S_0^2 N_{LS}^{-1} \quad (2.32)$$

$$\Sigma_{vv} = S_0^2 (P^{-1} - A N_{LS}^{-1} A^T) \quad (2.33)$$

Lorsque l'équation 2.31 n'est pas satisfaite, il y a rejet du test statistique. Les résidus normalisés ϖ sont calculés afin de détecter les stations de scans problématiques (observations suspectes) et de les dépondérer. Ce processus de dépondération est itératif et s'arrête lorsque chaque résidu normalisé (ϖ_i) satisfait le test de Student (Touze and Seube, 2013).

$$\varpi_i = \frac{v_i}{\zeta_i} \quad (2.34)$$

ζ_i est l'élément diagonal de la matrice Σ_{vv} avec $1 \leq i \leq n$.

- Si $\varpi_i \leq \lambda$ alors l'observation v_n^i garde le même poids ;
- Sinon, l'observation v_n^i est dépondérée.

La valeur de λ dépend également du test χ^2 :

- Lorsque le test est un succès λ est obtenu de la table inverse de la distribution de Student ;
- Lorsque le test est un échec λ est obtenu de la table inverse de la distribution normale.

La redondance interne r_i de chaque observation est aussi calculée de la manière suivante :

$$r_i = \zeta_i \times P_i \quad (2.35)$$

En résumé, la méthode d'ajustage proposée dépend de trois facteurs :

1. Le nombre de stations d'observations utilisé et leur variabilité. Plus ce nombre est grand, plus la redondance interne augmente et les paramètres estimés tendent vers leurs vraies valeurs.
2. La qualité des orientations relatives et celle de l'ajustement 3D des lignes de scan. Lorsque les angles de visée et la normale au plan sont mal initialisés, les résultats obtenus peuvent être aberrants ou parfois la solution diverge.
3. Les vecteurs directeurs doivent être coplanaires et cet aspect dépend fortement de la planéité de la surface utilisée pour l'ajustage. La méthode proposée utilise un seul et unique plan et par conséquent la justesse du résultat est risquée.

Pour terminer, il faut rappeler que cette méthode offre plusieurs avantages dont : le modèle fonctionnel linéarisé (2.21) ne prend d'aucun intrant lié au géoréférencement des retours lidar dans le repère de navigation (n), car aucun capteur de position n'est requis, et par conséquent aucune erreur de positionnement n'est absorbée par le modèle mathématique. Par exemple, la méthode est non sensible aux sources d'erreurs mentionnées au tableau (1.1) qui causent généralement des erreurs de positionnement qui se propagent dans la solution dans le cas des systèmes hybridés INS/GNSS.

Un autre avantage de taille est le principe stationnaire (immobilité) du système lors de l'acquisition des données. Pour cette raison, la méthode d'ajustage statique est réfractaire à des

erreurs résiduelles de latence IMU-lidar qui comme déjà évoqué, ont un impact important sur les applications du type terrestre compte tenu de la forte fréquence de variation des mouvements de la plateforme. Enfin, chaque station statique recueille des observations pendant un certain temps, ce qui augmente la fidélité des observations d'attitude et de retour lidar, car celles-ci sont moyennées.

Sans conquête, il est à noter que le programme principal (code source) servant à l'ajustage statique des angles de visée a été développé dans le cadre du projet de recherche " Calibrage automatique et analyse de performances de systèmes LiDAR " de l'entreprise CIDCO par Rabine Keyetieu sous la supervision de Nicolas Seube dans le contexte d'un SLM aérien. Celui-ci est repris et adapté pour le SLM terrestre à l'aide d'une librairie de fonctions développée durant mes stages Mitacs. L'adaptation au cas terrestre a nécessité des modifications mineures qui ont été apportées tout au long de la période de stage. Ces changements seront commentés dans le chapitre 3.

2.3 Mise en place du patron de lignes d'ajustage statique

Pour simuler des données à partir de plusieurs stations d'ajustage statique afin de valider numériquement le modèle mathématique d'ajustage des angles de visée dans le contexte d'un SLM terrestre, on effectue dans un premier temps la mise en place d'un programme qui permet de calculer les retours dans le repère lidar par rapport à une surface plane. Cet ensemble de données lidar simulées par calcul numérique sera considéré comme un patron de lignes d'ajustage statique. Cette validation est nécessaire, car le code source n'a jamais servi à l'ajustage de données collectées sur une surface plane verticale. Par la suite, on décrit le calcul permettant d'estimer la distance angulaire entre deux orientations. Pour terminer, avec chaque angle de visée, les stations statiques qui garantissent une distance angulaire optimale sont testées. Cette connaissance sera primordiale pour découpler les angles de visée à partir des stations de scans définies et pour déterminer le nombre d'observations minimal pour que tous les angles de visée puissent être ajustés par le même calcul.

Une variable est optimale lorsqu'elle décrit une performance idéale ou un gain favorable. Par exemple, l'intensité d'un retour lidar est optimale lorsque sa valeur normalisée est de 1 ou 100%. La distance angulaire optimale est la plus grande valeur angulaire possible entre deux orientations v_{bL} en fonction de l'angle de visée. Autrement dit, elle doit correspondre idéalement au double de l'angle de visée. Ainsi, elle permet la mise au point de la meilleure combinaison de stations de scan statique qui est par conséquent un plan d'acquisition optimal.

Tout d'abord, la convention d'Euler est utilisée pour les démonstrations suivantes, telle que montrée à la figure (2.10).

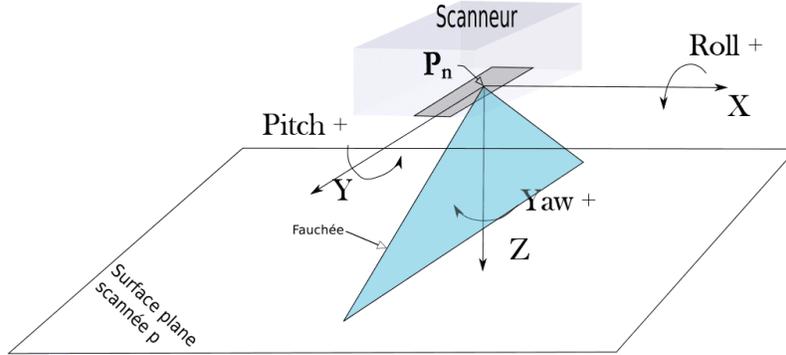


FIGURE 2.10 – Vue schématique d’une station de scan du SLM par rapport à une surface plane horizontale.

2.3.1 Définition du modèle mathématique

À partir de l’équation du plan scanné, on a programmé une routine qui permet de calculer la portée du tir lidar qui atteint cette surface dans le repère (n). L’équation paramétrique d’un plan se définit par la forme suivante.

$$S_p(x_n, y_n, z_n) = A_p \cdot x_n + B_p \cdot y_n + C_p \cdot z_n + D = 0 \quad (2.36)$$

En utilisant le logiciel de calcul symbolique Maple, on résout le système linéaire (2.36) avec X_n donnée par l’équation 2.12. La routine nommée “calc-range” permet de calculer cette distance à l’aide des entrées suivantes :

- La position du centre optique du lidar, $P_n(x, y, z)$, exprimé dans (n) ;
- Les angles de visée $\varphi_b, \theta_b, \psi_b$ du scanneur par rapport à l’IMU ;
- Les trois angles d’attitudes φ, θ et ψ de l’IMU ;
- Et les paramètres A, B, C, et D du plan infini (p) (A, B, C étant les cosinus directeurs du vecteur normal au plan et D étant la distance orthogonale entre le plan et l’origine du système de coordonnées qui correspond à la position P_n).

$$\nu_n = \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

avec

$$\begin{aligned}
A^\circ & : \arcsin A \\
B^\circ & : \arcsin B \\
C^\circ & : \arctan C
\end{aligned}$$

Tel qu'illustré aux figures (2.10 et 2.11), on considère le plan d'ajustage et la position du centre optique du lidar qui sera définie par une position P_n connue ; l'idée est de calculer les retours lidar à l'extrémité de la fauchée entre le point P_n qui représente la position du SLM et le plan défini.

Dans le but de simplifier, les trois angles d'attitude de la plateforme sont définis en supposant que le plan est orienté vers le Nord suivant l'axe X tel qu'illustré à la figure (2.11).

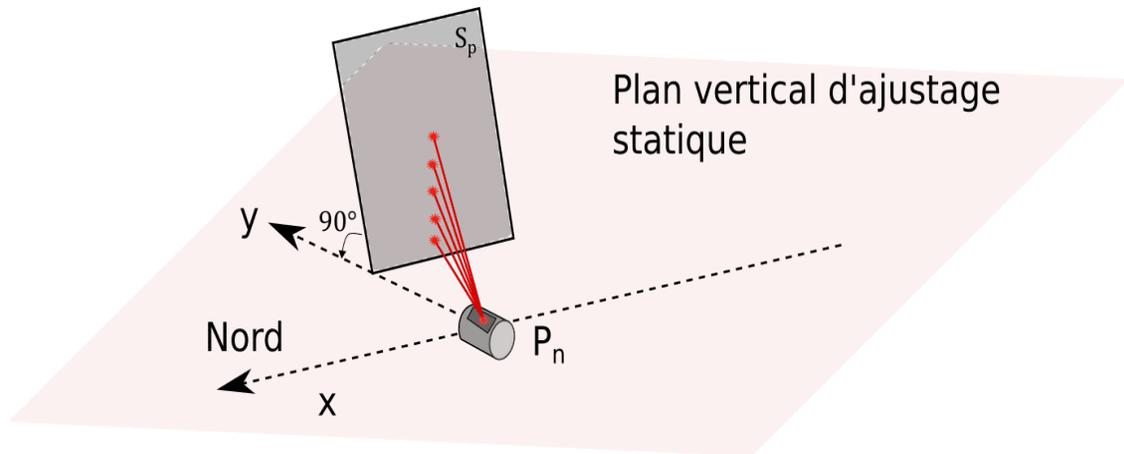


FIGURE 2.11 – Plan vertical orienté parallèlement à la direction Nord en X, à une distance D sur l'axe Y.

Pour calculer la portée pour que le tir lidar impacte le plan, il est nécessaire de faire certaines hypothèses, soit :

- Les bras de levier sont nuls pour simplifier les calculs ; l'origine du repère bI correspond au centre optique du lidar.
- On considère que la matrice $C_{bS}^{bI^*}$ est une identité.
- Les points géoréférencés X_n doivent appartenir au plan. Ces points représentent une ligne de scan pour chaque position P_n . Pour ce faire, l'équation (2.38) doit être satisfaite.
- On fixe la position (P_{n1}, P_{n2}, P_{n3}) du lidar par rapport à ce plan.

$$S(X_n) = 0 \tag{2.38}$$

L'équation (2.12) se réécrit de la façon suivante d'après les hypothèses émises :

$$X_n = \begin{pmatrix} P_{n1} \\ P_{n2} \\ P_{n3} \end{pmatrix} + \bar{\rho} \cdot C_{bI}^n(\varphi, \theta, \psi) \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ \sin \alpha \\ \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (2.39)$$

En résolvant l'équation (2.38), avec X_n donné par (2.36), on peut trouver le retour lidar associé à chaque angle de scan (α), et en déduire ensuite la valeur de X_n .

$\bar{\rho}$ représente la portée mesurée dans le repère (n) en fonction de l'angle d'incidence et en tenant compte de la présence de l'angle de visée. Sa valeur représente en moyenne celle du paramètre D du plan. Le calcul de la portée est alors une fonction des paramètres suivants :

$$\bar{\rho} := S(A, B, C, D, P_{n1}, P_{n2}, P_{n3}, \varphi_b, \theta_b, \psi_b, \varphi, \theta, \psi, \alpha) = 0 \quad (2.40)$$

2.3.2 Génération des lignes de balayage

En considérant les stations 1 et 2 suivantes (aller et retour) et un système ajusté, la figure (2.12) montre une représentation graphique de deux lignes de scans simulées ($\psi_1 = 0^\circ$ direction Nord, ligne bleue et $\psi_2 = 180^\circ$ direction Sud, ligne magenta). L'angle de dépointage (α), entre les tirs simulés est de 1° avec un intervalle d'émission du faisceau entre 0 et 180° (fauchée : nadir vers zénith). Le plan est à une distance de 5m du scanneur. La position pour chaque station statique est définie comme suit : $P_{n1}=0$, $P_{n2}=0$, $P_{n3}=1$. La portée est calculée avec des angles de visée nuls, car on considère un système qui est ajusté.

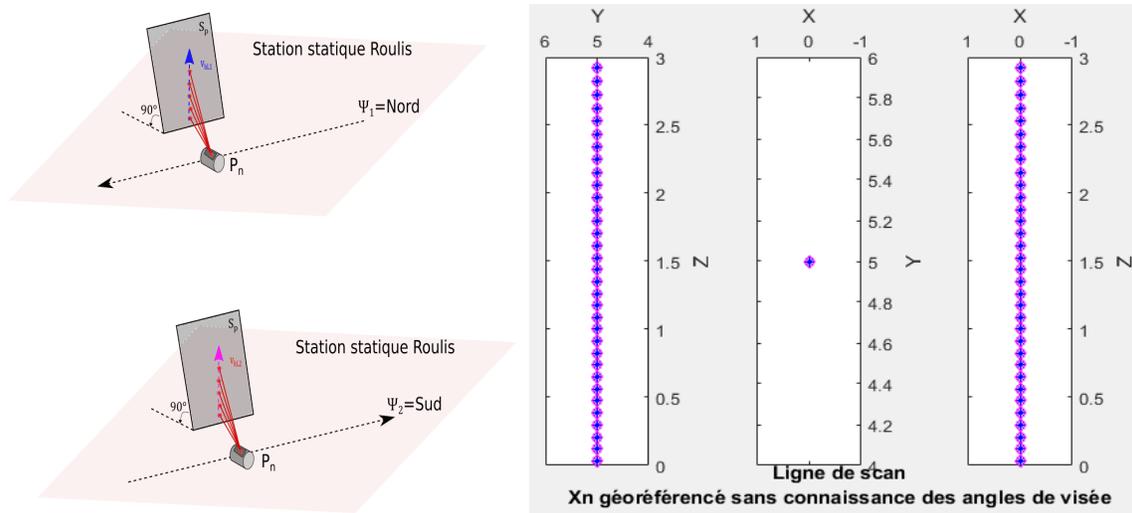


FIGURE 2.12 – Projection de deux lignes de scan en sens opposé. À gauche, plan vertical, à droite, ligne de scan représentant le profil du plan

Comme on peut le voir sur la portion de droite de la figure 3.12, les vues YZ (vue de profil des deux lignes de scan), XY (vue de dessus des deux lignes de scan) et XZ (vue de face des deux lignes de scan), montrent que les deux lignes de scans se superposent sans mésalignement lorsque le système est bien ajusté, même si les stations de scans sont différentes. Il est à noter que les points X_n ont été filtrés pour ne garder que ceux ayant un Z compris entre 0 et 3m, car le plan est infini. Cela permet de se rapprocher d'un cas pratique d'ajustage en laboratoire en utilisant un plan de dimension modérée (par exemple une table ou une surface usinée). Sur le terrain, les surfaces peuvent être plus grandes (par exemple façades de bâtiments), mais il est important de s'assurer que la surface utilisée soit bien nivelée sous réserve de l'incertitude de portée du lidar pour ne pas avoir des lignes de scans avec présence de courbures. Il faut comprendre que la présence d'un angle de visée impacte la valeur de la portée mesurée par le lidar (équation 2.40) et que par conséquent, les points X_n sont géoréférencés (équation 2.12) sans connaissance de cet angle de visée. En pratique, il s'agit d'un couplage des trois angles de visée φ_b , θ_b , et ψ_b .

Pour mieux comprendre l'impact des angles de visée, l'effet de chaque angle de visée sur le nuage de points sera exposé. L'objectif visé en faisant la simulation est de s'assurer que le plan d'acquisition est optimal afin d'obtenir un bon résultat d'ajustage. Pour ce faire, il est nécessaire de comprendre comment se manifeste individuellement chaque erreur d'alignement à l'aide d'un patron de lignes.

2.4 Détermination du plan d'expérience optimal pour l'ajustage statique

L'équation d'observations (2.14) requiert une série d'intrants pour déterminer les angles de visée du système. Ces observations doivent être d'une redondance minimale pour fidèlement estimer chacun des angles de visée (roulis, tangage, lacet) et la normale au plan d'ajustage. Une série minimale de cinq (5) équations d'observations est nécessaire pour trouver une solution aux cinq (5) paramètres inconnus. De plus, cette série d'observations doit permettre l'observabilité d'une erreur d'orientation de la ligne de scan due aux incertitudes d'un ou de plusieurs (3) angles de visée afin que les erreurs de fermetures de l'équation d'observations permettent d'estimer ceux-ci avec exactitude.

2.4.1 Démarche

L'objectif de cette partie est de définir une méthode pour estimer l'observabilité d'un mésalignement causé par les angles de visée à partir d'une série de stations d'observations pour l'ajustage statique. Cette analyse découlera de la mise en place d'un patron de lignes optimal pour l'observabilité simultanée des trois angles de visée. Ultimement, les stations utilisées dans ce processus formeront dès lors un plan d'expérience optimal pour l'acquisition de données

terrain nécessaire à l'ajustage statique des angles de visée d'un SLM.

En supposant que les angles de visée du SLM sont nuls, les points X_n assumés sont donnés par l'équation de géolocalisation suivante :

$$X_n = P_n + C_{bI}^n(\varphi, \theta, \psi) r_{bS} \quad (2.41)$$

On peut donc calculer les points X_n correspondants à une série de retours lidar, et en particulier les deux faisceaux extrêmes d'une fauchée. Nous notons par X_n^1 et X_n^2 les deux retours extrêmes. La ligne de scan assumée géoréférencée dans le repère (n) est alors :

$$v_0 = X_n^2 - X_n^1$$

Cette fois-ci, considérons un mésalignement des capteurs IMU-lidar (alors qu'en réalité les orientations relatives a priori sont nulles) noté $(\varphi_b, \theta_b, \psi_b)$. Pour géolocaliser les retours on applique encore le modèle de géolocalisation :

$$\widetilde{X}_n = P_n + C_{bI}^n(\varphi, \theta, \psi) C_{bI^*}^{bI}(\varphi_b, \theta_b, \psi_b) r_{bS} \quad (2.42)$$

À partir des deux faisceaux extrêmes du lidar, on a la ligne de scan anticipée qui sera décrite par :

$$v_b = \widetilde{X}_n^2 - \widetilde{X}_n^1$$

Sachant que l'orientation de la ligne assumée v_0 sera différente de celle de la ligne anticipée v_b à cause d'un défaut d'alignement de l'IMU par rapport au scanneur, on peut estimer cette différence de façon numérique. Pour ce faire, on calcule la distance angulaire entre ces deux vecteurs causée par l'effet de mésalignement. Par conséquent, supposons que v_b et v_0 ne sont pas coplanaires. La distance angulaire (Δ) se calculera comme suit :

$$\Delta = \arccos(v_0 \cdot \nu_n) - \arccos(v_b \cdot \nu_n) \quad (2.43)$$

Plus cette distance est grande, plus on considère que l'observabilité est optimale. De même, cette distance est nulle lorsque les angles de visée sont nuls.

Tel que démontré dans cette section, on peut quantifier l'observabilité (2.43) d'une erreur d'angle de visée de manière angulaire à partir d'observations en mode statique sur un plan. Nous allons maintenant étudier l'effet de chaque angle de visée séparément pour déterminer la station statique par rapport au plan qui donne l'observabilité optimale pour celle-ci.

2.4.2 Caractérisation du mésalignement causé par l'erreur de roulis et détermination du patron de lignes optimal pour son estimation

Le mésalignement causé par l'angle de visée en roulis est plus facile à trouver, car il est observable géométriquement en comparant deux lignes de scans issues d'une même position, mais avec des directions opposées qui sont parallèles au plan (Legris et al., 2017; Keller and Sternberg, 2013; Rieger et al., 2008). Comme on le voit à la figure (2.13), lors du premier passage (aller), le plan scanné est représenté par la ligne rouge. Lors du deuxième passage (retour), la représentation du même plan (ligne verte) a subi une rotation dans un sens contraire par rapport à la vérité terrain (ligne noire). Par conséquent, on observe un mésalignement entre les deux orientations qui est du double de l'erreur ($2\varphi_b$) d'angle de visée en roulis.

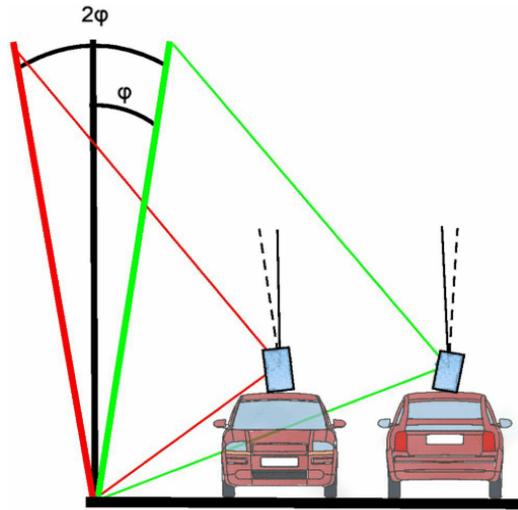


FIGURE 2.13 – Mésalignement de deux lignes de scan causé par un angle de visée en roulis de signe positif (Keller P. et al., 2013).

Dans un premier temps, en partant de ce qui est annoncé à la section 3.3.1, il est possible de simuler un angle de visée en roulis sur une ligne de scan géoréférencée par la méthode décrite ci-haut. En utilisant l'équation 2.12 avec $\varphi_b = 0,5^\circ$, $\theta_b = 0^\circ$ et $\psi_b = 0^\circ$ pour le calcul de $\bar{\rho}$ (équation 2.40), on calcule l'orientation de la ligne de scan dans le repère n. On considère les mêmes stations d'observations illustrées à la figure (2.12). Dans un deuxième temps, on aborde l'impact de l'inclinaison du plan pour la mise en évidence de l'erreur de roulis. À la figure (2.14), à gauche avec un plan droit, le mésalignement causé par l'erreur de roulis est bien observable, dans la vue de profil du plan YZ, à l'aide de deux stations statiques d'observations. À droite, le même mésalignement se caractérise par un croisement très aigu entre les lignes de scan dans le cas d'un plan incliné. L'effet engendré est donc un basculement du haut du plan vers l'arrière à l'aller et vers l'avant au retour (figure 2.13). La vue XY montre le plan en

largeur suivant l'axe X (vue de dessus). La vue XZ montre une vue de face avec une ligne de scan qui domine à l'affichage par rapport à l'autre (et vice versa) au point de croisement des deux lignes de scan. On peut aussi remarquer dans le graphique YZ que la plus grande erreur linéaire entre deux points coïncidents est de 3,6cm entre les deux lignes de scan. Dans le cas du plan incliné, cette même distance est d'environ 14cm. On a donc une performance quatre fois meilleure avec un plan vertical incliné. En milieu urbain, il est plus facile de trouver un plan vertical droit, ce qui justifie une valeur d'inclinaison nulle pour la simulation. On pourrait aussi envisager l'usage d'un plan artificiel avec une inclinaison dynamique.

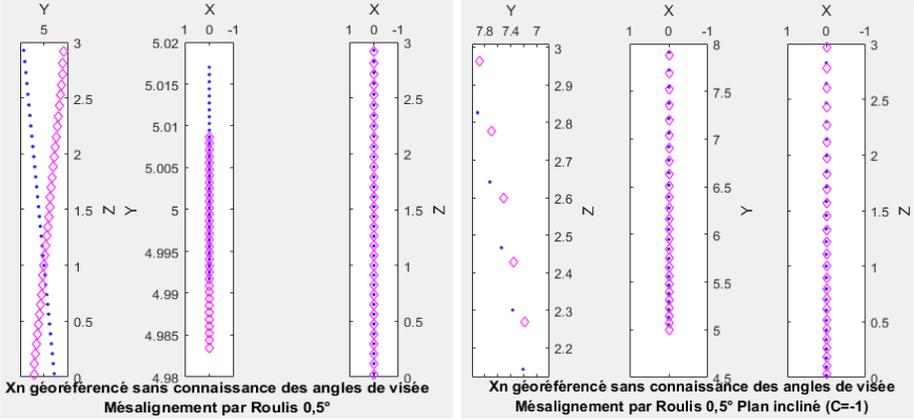


FIGURE 2.14 – Effet d'un mésalignement causé par l'erreur de roulis, à gauche plan droit, à droite plan incliné. $\psi_1 = 0^\circ$ direction Nord, ligne bleue et $\psi_2 = 180^\circ$ direction Sud, ligne magenta.

Pour définir un patron de lignes optimal pour le calcul d'un mésalignement causé par l'erreur de roulis, dans un premier temps on définit quelques valeurs arbitraires pour les angles d'attitude (roulis, tangage et lacet) en utilisant la convention d'Euler. Par exemple, le lacet peut varier entre 0 et 360° par rapport au plan. Le roulis de $\pm 5^\circ$ et le tangage de $\pm 45^\circ$.

Deuxièmement, supposons trois types de plans verticaux pour la suite des démonstrations. Dans le contexte d'un lidar qui scanne latéralement tel qu'illustré à la figure (2.7), le plan scanné se trouve à une certaine distance de l'axe Y. Le paramètre B est donc égal à 1. Le paramètre D est égal à la distance entre l'origine du repère (n) et le plan (de signe positif à l'ouest et négatif à l'est). Le paramètre A est nul, car le plan est orienté vers le Nord. L'inclinaison verticale du plan dépend de son paramètre C. Ce paramètre, par rapport à l'axe Z, est compris entre -1 et 1, ce qui représente une inclinaison entre 0 et 45° telle qu'illustrée ci-après. On peut donc définir un plan avec une inclinaison nulle et deux autres avec une inclinaison positive ou négative.

La figure (2.15) illustre une représentation graphique de ces trois types de plan.

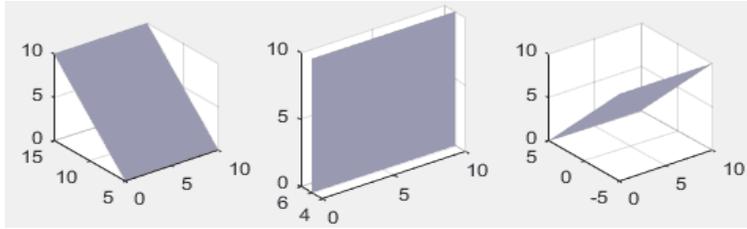


FIGURE 2.15 – Orientation du plan par rapport à l’axe Z ; à gauche $C = -1$ (inclinaison vers l’est), au centre $C = 0$ (inclinaison nulle) et à droite $C = 1$ (inclinaison vers l’ouest)

Considérons une série finie (S) de n valeurs pour chacun de ces cinq (5) paramètres. Pour i allant de 1 à n , pour trouver la meilleure paramétrisation du plan et les stations statiques de scans assorties, on calcule pour chaque ligne de scan :

- 1 angle de roulis optimal φ
- 1 angle de tangage optimal θ
- 1 angle de lacet optimal ψ
- L’orientation optimale du plan (C)
- La distance d’éloignement optimal du scanneur par rapport au plan (D)

En calculant la distance angulaire donnée par l’équation 2.43 pour chaque valeur de S et en les comparant, on estime les quatre (5) valeurs optimales associées à ces cinq paramètres. Ces optimums se caractérisent par une distance angulaire qui atteint sa croissance maximale lorsque l’itération en boucle est achevée.

Le tableau (2.2) présente les dix (10) plus grandes distances angulaires obtenues (en degrés décimaux), à partir de S, pour optimiser le patron de lignes d’ajustage statique, dans le cas d’un mésalignement causé par l’angle de visée en roulis (φ_b). Comme on peut le constater, les meilleurs résultats sont obtenus avec des stations perpendiculaires au plan (lacet proche de $0/180^\circ$). Une faible inclinaison à bâbord du SLM (roulis négatif) permet aussi de maximiser l’observabilité. On constate aussi qu’un plan incliné avec une pente maximale vers l’est optimise les stations statiques pour l’ajustage de l’angle de visée en roulis. La distance d’éloignement du scanneur par rapport au plan n’a aucun impact sur les résultats dans le cas du roulis. Avec un plan droit, les performances sont moindres. Cependant, on peut obtenir de bons résultats en augmentant les angles de roulis et de tangage.

TABLEAU 2.2 – Optimisation du patron de lignes sur plan incliné, axe de roulis, erreur d'alignement de $0,5^\circ$ simulé

C plan	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Distance angulaire ($^\circ$)	1.2248	1.3195	1.3639	1.4023	1.4089	1.4142	1.4142	1.4142	1.4142	1.4142
Roulis ($^\circ$)	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15	0
Tangage ($^\circ$)	-30	-45	-45	0	0	-45	-45	0	0	0
Lacet ($^\circ$)	0	0	15	345	190	80	100	0	180	0

2.4.3 Caractérisation du mésalignement causé par l'erreur de tangage et détermination du patron de lignes optimal pour son estimation

Pour le mésalignement causé par l'erreur de tangage, la géométrie devient problématique pour l'observabilité de l'effet du désalignement. En effet, en utilisant des stations perpendiculaires comme démontré pour le mésalignement causé par l'erreur de roulis, on remarque que la ligne de scan anticipée est en décalage angulaire par rapport à la ligne de scan assumée dans une vue de face (figure 2.16), mais pas en une vue de profil (plan YZ). Par conséquent, il faut faire les passages perpendiculairement au plan tels qu'illustrés par Keller and Sternberg (2013) en mode dynamique. Cela permet de voir un décalage angulaire dans la vue de profil qui nous intéresse. Ainsi, on observe un mésalignement entre les deux orientations qui est du double de l'erreur ($2\theta_b$) d'angle de visée en tangage. En mode statique, on utilise un point de vue rasant (presque parallèle) pour s'assurer de rester dans la même partie du plan que les autres stations perpendiculaires. Les angles d'attitude pour observer l'erreur de tangage seront déterminés par optimisation.

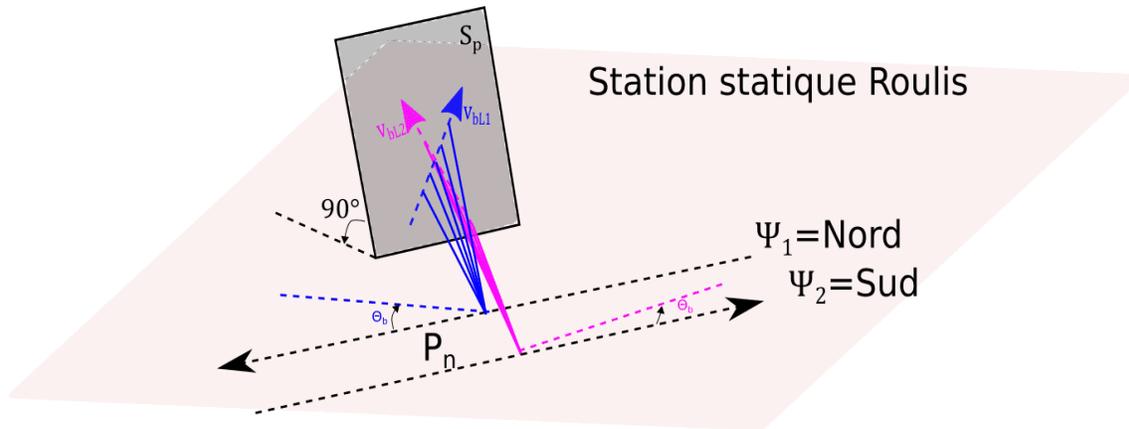


FIGURE 2.16 – Distance angulaire non observable entre deux orientations pour une erreur de tangage à partir d'une station statique perpendiculaire au plan.

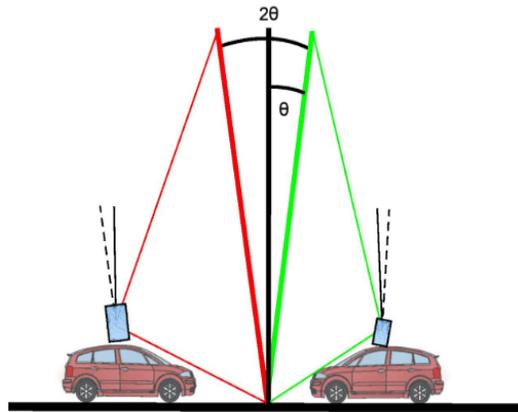


FIGURE 2.17 – Mésalignement de deux lignes de scan causé par un angle de visée en tangage de signe positif à l'aide d'un passage perpendiculaire au plan (Keller P. et al., 2013).

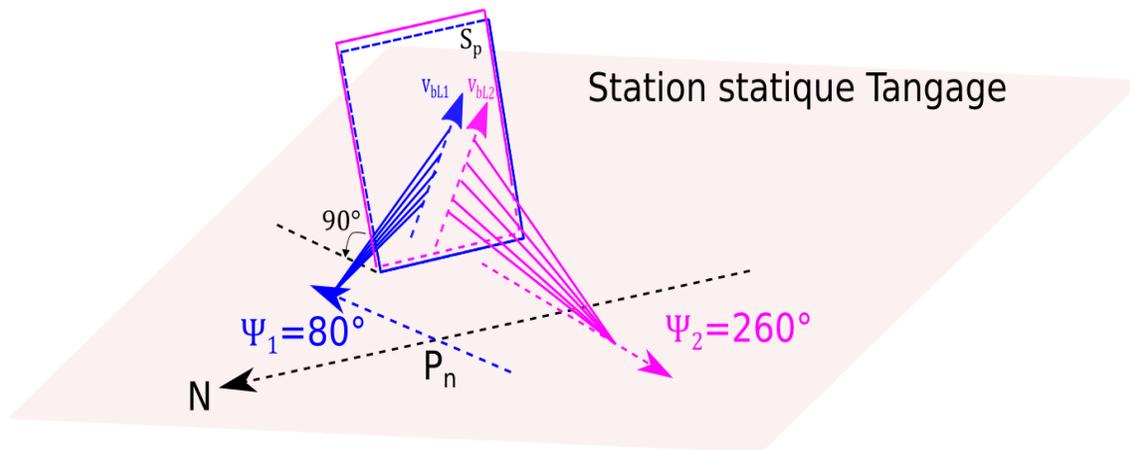


FIGURE 2.18 – Station rasante pour observabilité du mésalignement des deux orientations des vecteurs

Considérant les stations rasantes 1 et 2 montrées à la figure (2.18), voici une représentation graphique (figure 2.19) de deux lignes de scan simulées ($\psi_1 = 80^\circ$ ligne bleue et $\psi_2 = 260^\circ$ ligne magenta). En utilisant l'équation (2.42) avec $\varphi_b = 0^\circ$, $\theta_b = 0.5^\circ$ et $\psi_b = 0^\circ$, on calcule l'orientation de la ligne de scan dans le repère n. À la figure (2.19), à gauche avec un plan droit, le mésalignement causé par l'erreur de tangage simulée est bien observable à l'aide des deux stations statiques d'observations à la vue YZ. La distance entre deux points coïncidents est d'environ 2cm. Dans la vue XZ, elle se caractérise par un croisement des lignes de scan représentant le même plan tel que vu à la figure 2.16. Les vues de haut et de face (XY et XZ)

montrent un décalage (environ 30m) entre les deux lignes, car les retours simulés proviennent d'un plan infini. Ceci n'équivaut pas nécessairement à une observabilité du mésalignement entre deux orientations. À droite, le même mésalignement se caractérise par un croisement très aigu entre les lignes de scan dans le cas d'un plan incliné.

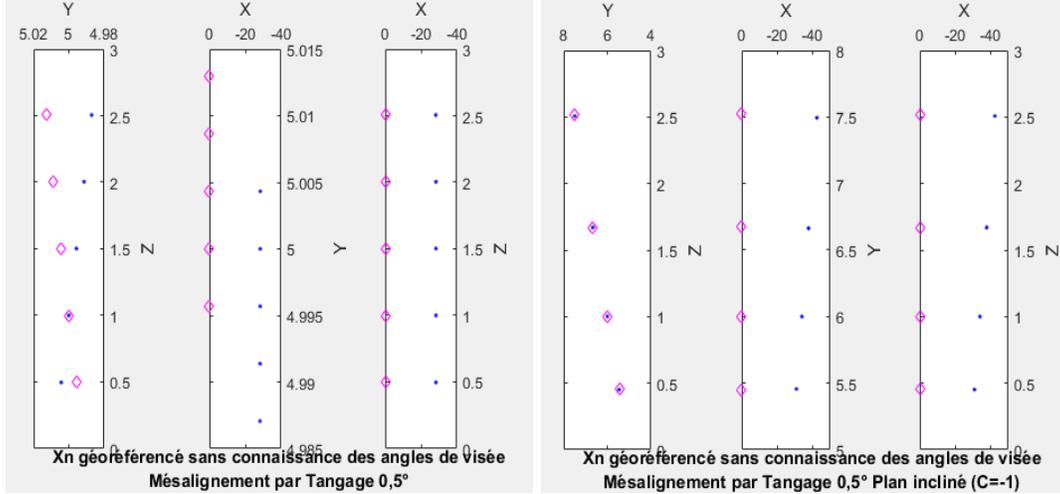


FIGURE 2.19 – Effet d'un mésalignement causé par l'erreur de tangage, à gauche plan droit, à droite plan incliné. $\psi_1 = 80^\circ$ direction N-E, ligne bleue et $\psi_2 = 260^\circ$ direction S-O, ligne magenta.

Les résultats obtenus pour l'optimisation du plan d'expérience dans le cas d'un angle de visée θ_b égal à 0.5° sont présentés dans le tableau (2.3).

TABLEAU 2.3 – Optimisation du patron de lignes sur plan incliné, axe de tangage, erreur d'alignement de $0,5^\circ$ simulé

C plan	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Distance angulaire ($^\circ$)	1.2124	1.3035	1.3037	1.3284	1.3725	1.3750	1.3976	1.3976	1.3976	1.3976
Roulis ($^\circ$)	-30	-30	-30	-15	15	15	-15	0	0	15
Tangage ($^\circ$)	30	45	45	-45	45	45	-45	45	45	-45
Lacet ($^\circ$)	80	100	80	260	100	80	280	100	80	260

Encore une fois, l'optimisation par calcul de l'observabilité permet de prouver, en accord avec les auteurs cités, que l'angle de lacet doit être perpendiculaire au mur pour la station d'ajustage en tangage. Le plan incliné fournit aussi les meilleurs résultats comparés au plan vertical droit. L'interprétation des résultats démontre qu'on a besoin d'une station de tir lidar très rasante pour obtenir un décalage entre les vecteurs v_b et v_0 sur un plan incliné. À cette rasance, il faut ajouter une forte inclinaison du SLM avec des angles de $\pm 45^\circ$ en tangage et une légère rotation vers bâbord ou tribord. Dans le cas d'un plan droit, la performance obtenue est 2 fois moindre, mais il faut des stations rasantes avec des valeurs de roulis et de tangage

nulles. La distance d'éloignement du scanneur a un impact négligeable sur l'observabilité de l'erreur de tangage.

2.4.4 Caractérisation du mésalignement causé par l'erreur de lacet et détermination du patron de lignes optimal pour son estimation

Selon Keller and Sternberg (2013), l'erreur de lacet est observable en scannant un objet circulaire avec deux passages en direction opposée décalée d'une distance égale au double de la portée du tir lidar. L'effet d'un mésalignement causé par l'erreur de lacet se manifeste par une translation du plan scanné par rapport à la réalité terrain comme montrée à la figure (2.20).

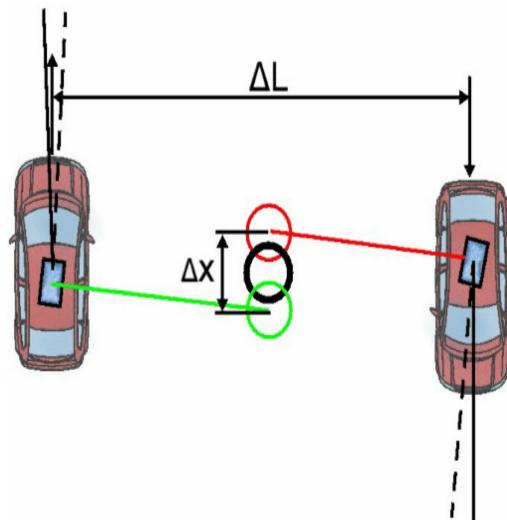


FIGURE 2.20 – Mésalignement sur un objet circulaire causé par un angle de visée en lacet de signe positif à l'aide d'un passage dynamique parallèle à l'objet (Keller P. et al., 2013).

En pratique, un objet circulaire dans la scène peut être un lampadaire, une borne-fontaine, un cylindre pour ne citer que quelques exemples. Selon Leslar (2016), en utilisant un plan comme cible, le mésalignement causé par un angle de visée en lacet se caractérise comme illustré à la figure (2.21).

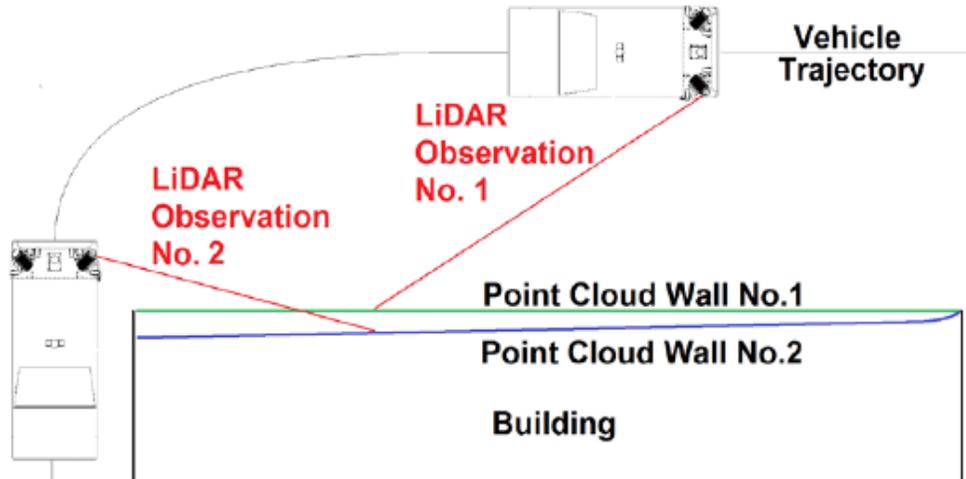


FIGURE 2.21 – Effet d’un mésalignement sur un plan causé par l’erreur de lacet de signe positif à l’aide d’un passage dynamique avec deux angles de rasance différents $80^{\circ}/100^{\circ}$ (Michael Leslar, 2016).

Dans le cas de l’ajustage en mode statique, on scanne une seule ligne par rapport au plan sans bouger. De plus, le changement de distances par rapport au plan ne sera pas observable sur des vecteurs directeurs contrairement à l’ajustage en mode dynamique. En optimisant les angles de rasance par l’ajout d’une rotation en roulis et en tangage, on peut observer le mésalignement dans la vue YZ à la figure (2.22). Ceci indique qu’on peut calculer une distance angulaire. L’éloignement maximal entre deux points coïncidents est d’environ 50cm. Les vues de haut et de face (XY et XZ) montrent un décalage (environ 30m) entre les deux lignes, car les retours simulés proviennent d’un plan infini. Ceci n’équivaut pas nécessairement à une observabilité du mésalignement entre deux orientations. À droite, le même mésalignement se caractérise par un croisement très aigu entre les lignes de scan dans le cas d’un plan incliné. L’éloignement maximal est du double dans ce cas.

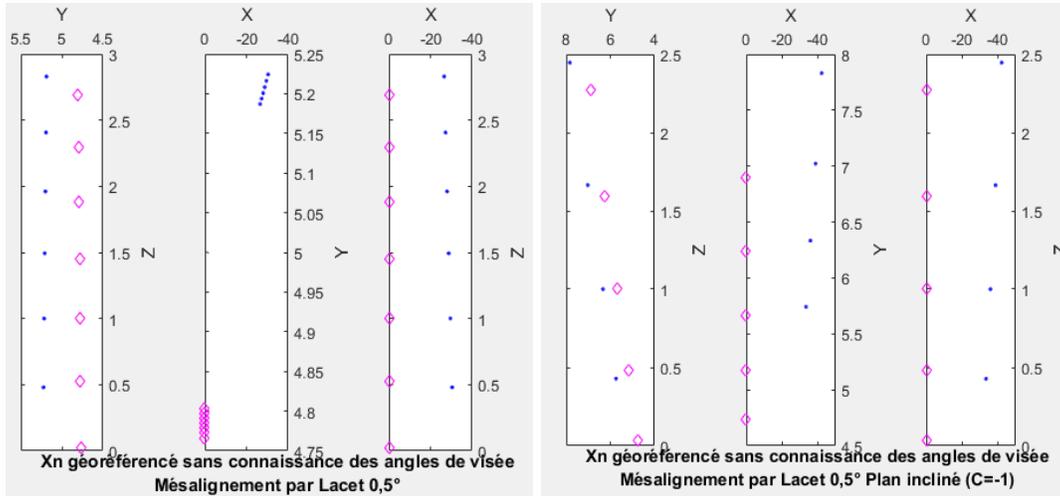


FIGURE 2.22 – Effet d’un mésalignement causé par l’erreur de lacet, à gauche plan droit, à droite plan incliné. $\psi_1 = 80^\circ$ direction N-E, ligne bleue et $\psi_2 = 100^\circ$ direction S-E, ligne magenta.

Le tableau (2.4) présente les résultats obtenus pour l’optimisation du patron de lignes dans le cas d’un angle de visée ψ_b de 0.5° pour l’axe de lacet. Tout d’abord, on peut remarquer que la valeur optimale pour le paramètre C est de -1, comme dans le cas du roulis et du tangage. Ceci signifie que le meilleur plan pour l’ajustage statique des angles de visée est un plan incliné avec une pente de 45° vers l’est. En ce qui a trait aux angles d’Euler, on peut noter que la meilleure distance angulaire est obtenue en combinant une forte inclinaison du SLM en roulis et en tangage. La tendance bâbord se maintient pour le roulis. Cependant, après vérification, l’inclinaison avec l’axe de tangage contribue au moins 80% de la distance angulaire comparée à celle du roulis dans ce contexte.

TABLEAU 2.4 – Optimisation du patron de lignes sur plan incliné, axe de lacet, erreur d’alignement de $0,5^\circ$ simulé

C plan	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Distance angulaire ($^\circ$)	0.7651	0.8425	1.0032	1.0032	1.0438	1.1245	1.2041	1.3379	1.3412	1.3448
Roulis ($^\circ$)	-15	-15	-15	-30	-30	-15	-15	-15	-30	-30
Tangage ($^\circ$)	-45	-30	-30	45	0	0	30	30	-30	30
Lacet ($^\circ$)	180	280	260	80	80	80	80	100	80	100

Il est nécessaire que toutes les stations soient rasantes par rapport au plan (par exemple lacet de 80 ou 100°) pour maximiser l’effet de rotation du vecteur directeur v_b par rapport au vecteur v_0 dû à une erreur de lacet. Par la suite, il faut ajouter des rotations presque extrêmes en roulis et en tangage, mais avec des signes opposés. Dans le cas du plan droit, l’angle d’attitude en tangage doit être légèrement plus faible. La distance d’éloignement du scanneur n’a pas d’impact significatif sur l’observabilité de l’erreur de lacet.

2.4.5 Détermination du patron de lignes optimal pour l'estimation simultanée des trois angles de visée $\varphi_b, \theta_b, \psi_b$

En combinant simultanément les trois angles de visée en roulis, tangage et lacet, on peut aussi optimiser le patron de lignes d'ajustage statique des angles de visée. Tel que déjà vu au cas par cas, en trouvant les angles d'attitude du SLM pour lesquels l'observabilité est maximale, on peut déterminer théoriquement un plan d'acquisition optimal. Cependant, pour évaluer si celui-ci peut être défini comme un plan d'expérience optimal, une application sur des données simulées dans un premier temps et sur des données réelles par la suite est nécessaire. Le tableau (2.5) présente une sélection de 16 stations qui ont été testées pour ajuster simultanément les trois angles de visée d'un SLM, quelles que soient leurs valeurs. Parmi ces stations, on peut remarquer que les combinaisons d'angles d'attitude permettent de s'assurer que chaque patron de lignes optimal obtenu lors de l'analyse au cas par cas est pris en compte, et pour le mésalignement causé par l'erreur de roulis (par exemple les stations 3, 4), et pour le mésalignement causé par l'erreur de tangage (par exemple les stations 1, 2), et pour le mésalignement causé par l'erreur de lacet (par exemple les stations 5, 6). En générant une série aléatoire de 12 valeurs d'angles de visée entre -1° et 1° , des tests ont été effectués pour vérifier l'efficacité de ce nombre de stations pour garantir une observabilité de tous les angles de visée dans le cas d'un plan vertical. À la prochaine section, les résultats obtenus par l'estimation numérique de ces valeurs par la méthode d'ajustage ci-haut décrite seront présentés pour des données lidar simulées.

TABLEAU 2.5 – Plan d'expérience optimal pour l'ajustage statique des angles de visée φ_b, θ_b et ψ_b

Station #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
lacet (ψ°)	260	100	0	180	80	100	80	100	80	100	260	100	260	100	0	180
tangage (θ°)	-45	45	0	0	45	30	-15	45	-5	45	25	-45	-45	30	-45	45
roulis (φ°)	5	5	0	0	15	-15	-15	15	15	-15	-10	10	-15	15	0	0

2.4.6 Résultats expérimentaux

Les données simulées visent à tester la robustesse de la méthode proposée face au bruit. La méthode d'ajustement des angles de visée énoncée a été mise en application pour tenter d'estimer les angles de visée induits dans les observations qui ont été générées par simulation en se servant du patron de lignes de 16 stations proposées ci-haut. Le plan d'ajustage simulé est incliné à 45° vers l'est à une distance de 10m du centre optique O du lidar qui se trouve à une hauteur de 1m par rapport au sol. Un exemple des résultats obtenus est présenté ci-après pour commenter quelques expériences que l'on peut aussi faire avec des données simulées. En effet, comme en pratique les observations sont affectées par du bruit, il est possible de simuler cet effet sur les observations simulées. La réalisation de ce processus aléatoire suit une loi normale d'espérance nulle ($\mu=0$). C'est-à-dire, on simule par exemple un bruit de mesure de

moyenne nulle et d'écart-type égale à $\pm 0.05^\circ$ en roulis et tangage, $\pm 0.1^\circ$ en lacet et $\pm 1\text{cm}$ pour le plan de balayage du scanner.

Pour le tableau (2.6), les observations simulées ayant servi à l'estimation des angles de visée sont affectées d'une erreur aléatoire au niveau des angles d'attitude.

Pour le tableau (2.7), un bruit gaussien a été ajouté aux valeurs de portée.

Pour le tableau (2.8), une combinaison de l'erreur aléatoire de portée et celle des angles d'attitude est réalisée.

TABLEAU 2.6 – Résultats d'ajustement des angles de visée en ajoutant un bruit gaussien aux données d'attitude (3 angles d'Euler φ, θ, ψ des stations)

Nombre de stations	ϕ_b roulis (deg)	θ_b tangage (deg)	ψ_b lacet (deg)	Facteur de variance à postériori S_0^2
16	0.6	-0.5	0.7	1
Incertitude σ ($^\circ$)	0	0	0	
Valeurs simulées $\varphi_b, \theta_b, \psi_b$	0.6	-0.5	0.7	-

TABLEAU 2.7 – Résultats d'ajustement des angles de visée en ajoutant un bruit gaussien aux tirs lidar simulés

Nombre de stations	ϕ_b roulis (deg)	θ_b tangage (deg)	ψ_b lacet (deg)	S_0^2
16	0.61	-0.497	0.71	1
Incertitude σ ($^\circ$)	0.012	0.011	0.025	

TABLEAU 2.8 – Résultats d'ajustement des angles de visée en combinant ces deux erreurs aléatoires

Nombre de stations	ϕ_b roulis (deg)	θ_b tangage (deg)	ψ_b lacet (deg)	S_0^2
16	0.604	-0.513	0.723	1
Incertitude σ ($^\circ$)	0.011	0.01	0.023	

Pour les données lidar simulées à l'aide du patron de ligne de 16 stations, le tableau (2.6) montre les résultats de l'ajustement des angles de visée lorsqu'on ajoute un bruit de mesure aux observations d'attitude. Ces valeurs correspondent exactement à celles qui ont été simulées sur les lignes de scan. Les écarts-types associés aux angles estimés sont nuls. Même en

augmentant l'ampleur du bruit sur les observations d'attitude (par exemple 1° en lacet), les écarts-types demeurent encore stationnaires. Le tableau (2.7) présente des résultats plus intéressants lorsqu'on ajoute un bruit de mesure aux observations lidar (par exemple 1cm de bruit sur le plan de balayage). En ce faisant, on peut constater que les écarts-types associés aux valeurs estimées absorbent une partie de ce bruit, de même que les valeurs finales estimées. L'incertitude du lacet est doublée par rapport à celle de roulis et de tangage. Au tableau (2.8), on constate que la combinaison de ces deux bruits gaussiens sur les observations résulte en une légère surestimation des angles de visée avec un effet plus marqué dans le cas du lacet. En augmentant le bruit de mesure du lacet d'un facteur 10, les valeurs estimées sont légèrement affectées dans le cas du roulis ($0,03^\circ$) et du tangage ($0,01^\circ$) alors que le lacet absorbe en plus grande proportion ($0,07^\circ$). Cependant, lorsqu'on tente d'estimer des angles de visée dont l'ordre de grandeur est plus petit que les valeurs d'angles de visée utilisées dans cet exemple 2.6, par exemple $(\varphi, \theta, \psi=0^\circ; 0.1^\circ; 0.2^\circ)$, le patron de lignes de 16 stations fournit des résultats non acceptables. Ceci indique que le nombre de stations pour l'ajustement n'est pas optimal. Cependant, en améliorant l'initialisation de la normale du plan, les valeurs finales déterminées sont justes. Dans l'optique de pousser cette expérience et de déterminer un plan d'expérience optimal, on poursuit les tests vers une collecte de données lidar avec le SLM MX2.

2.5 Ajustage de la latence d'un SLM

Tel que discuté au chapitre 1, la latence est subdivisée en deux parties. Lorsqu'on travaille avec un SLM dont l'IMU fournit la position et l'attitude, c'est-à-dire une hybridation INS/GNSS, la latence POS-IMU est nulle. En effet, le récepteur du GNSS est interne à l'INS et fournit une synchronisation temporelle par PPS et par message ZDA (temps UTC, date, temps local) au lidar. En considérant que le modèle de géolocalisation est perturbé par une latence dt , on peut donc réécrire l'équation 1.1 de la manière suivante :

$$\widetilde{X}_n := \begin{pmatrix} \widetilde{x}_n \\ \widetilde{y}_n \\ \widetilde{z}_n \end{pmatrix} = P_n(t) + C_{bI}^n(t - dt_{LI}) (a_{bI} + C_{bS}^{bI} r_{bS}(t - dt_{LP})) \quad (2.44)$$

- \widetilde{X}_n : le point géolocalisé perturbé par la latence
- t : le temps GNSS est noté t ;
- dt_{LI} : est la latence entre le lidar et l'IMU ;
- dt_{LP} : est la latence entre le lidar et le GNSS.

Deux méthodes d'ajustage de la latence ont été appliquées. Une méthode d'ajustage basée sur une vitesse linéaire et une méthode d'ajustage basée sur une vitesse angulaire.

2.5.1 Latence lidar-POS

La première méthode consiste à effectuer deux passages à des vitesses différentes sur une distance horizontale selon l'axe de déplacement du SLM. Ces vitesses doivent être constantes et l'objectif est d'estimer la latence à partir d'une erreur géométrique détectable visuellement. Cette erreur se décrit comme la translation (ΔX) d'une arête d'un bâtiment (figure 2.24) ou d'un plan résultant d'un délai de synchronisation entre la mesure physique du lidar et son enregistrement. La procédure de mesure est suggérée dans (Keller and Sternberg, 2013) telle que montrée à la figure (2.23). Il est important que les deux passages soient dans le même sens, car on ne doit pas confondre le mésalignement causé par les angles de visée (comme déjà vu plus haut dans le cas du roulis) du décalage causé par la latence. Pour ce faire, le recouvrement est effectué dans le même sens que le premier passage. Cela s'applique aussi dans le cas du bras de levier aligné avec la direction du déplacement (a_x). Pour annuler l'impact des bras de levier a_y et a_z , il faut que le SLM répète exactement la même trajectoire. Par exemple, le banc de calibrage du laboratoire de métrologie permet de répondre à cette contrainte liée à la trajectoire. La latence doit être corrigée avant l'estimation des angles de visée et des bras de levier (Picard and Seube, 2012).

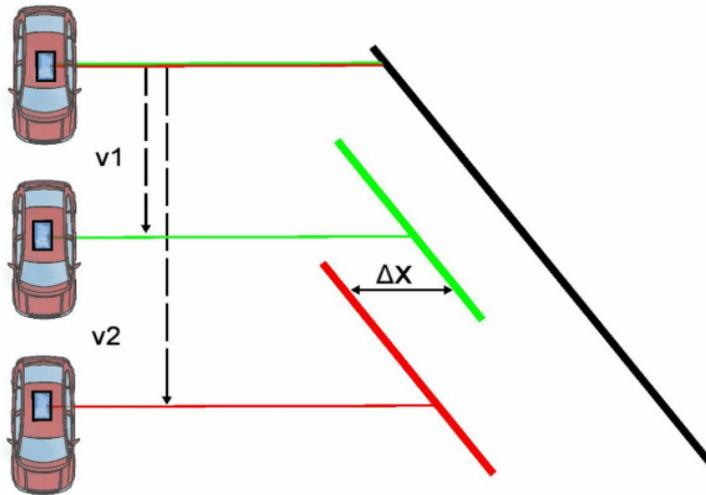


FIGURE 2.23 – Patron de lignes d'un passage dynamique avec angle de rasance pour détecter la latence d'un SLM sur des plans verticaux (Keller et al., 2013).

Un site d'ajustage in-lab doit donc être priorisé. Cependant, en suivant la méthode proposée par Keller et al. (2013), un site similaire situé sur le campus de l'Université Laval peut être utilisé en montant le SLM sur un charriot. La vitesse réalisable est relativement faible dans ce contexte. Dans le cas d'un levé en mode dynamique en véhicule, cette procédure peut se réaliser sur des objets de grande taille par exemple, un bâtiment tel que montré ci-après.

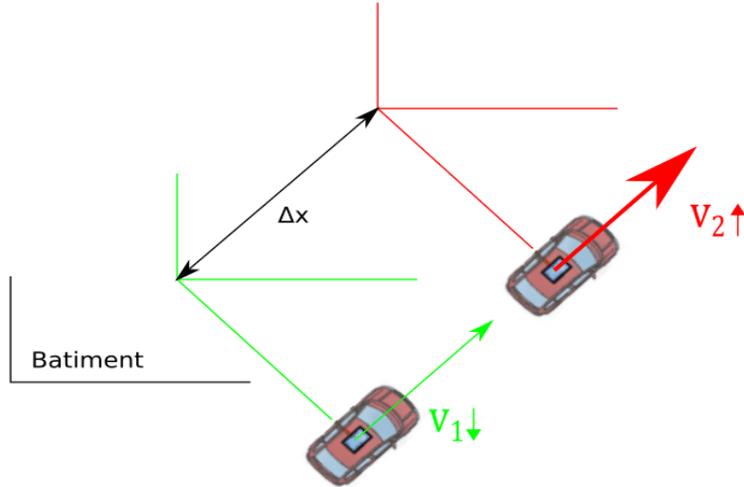


FIGURE 2.24 – Patron de lignes d’un passage dynamique avec angle de rasance pour détecter la latence d’un SLM sur un mur de bâtiment

En déterminant la distance entre les deux nuages de points au temps du premier passage t_1 et au temps du deuxième passage t_2 , la formule suivante permet d’estimer la latence :

$$dt = \frac{\Delta X}{V_{t2} - V_{t1}} \quad (2.45)$$

- ΔX : est une distance horizontale selon l’axe de déplacement ;
- V_{t1} : est la vitesse constante au temps du premier passage qui est non nulle ;
- V_{t2} : est la vitesse constante au temps du deuxième passage qui est significativement différente.

On peut donc remarquer que comme dans le cas des angles de visée, cette méthode requiert des données en recouvrement sur un même objet. La représentation de cet objet est comparée à deux époques différentes. L’erreur $\delta_{\Delta X}$ commise lors de l’estimation du décalage ΔX dépend de la distance entre deux lignes de scan. Cette distance est calculée connaissant la fréquence de balayage et la vitesse de déplacement du scanneur. Selon Rieger et al. (2010), dans le cas d’un scanneur 2D qui scanne perpendiculairement à la direction de déplacement (figure 2.25) du SLM, cette distance est obtenue par la formule ci-après :

$$d = \frac{v}{LPS} \quad (2.46)$$

LPS est le nombre de Lignes Par Seconde. r est la distance par rapport au plan. PRR (Pulse Repetition Rate) est le nombre de points par seconde.

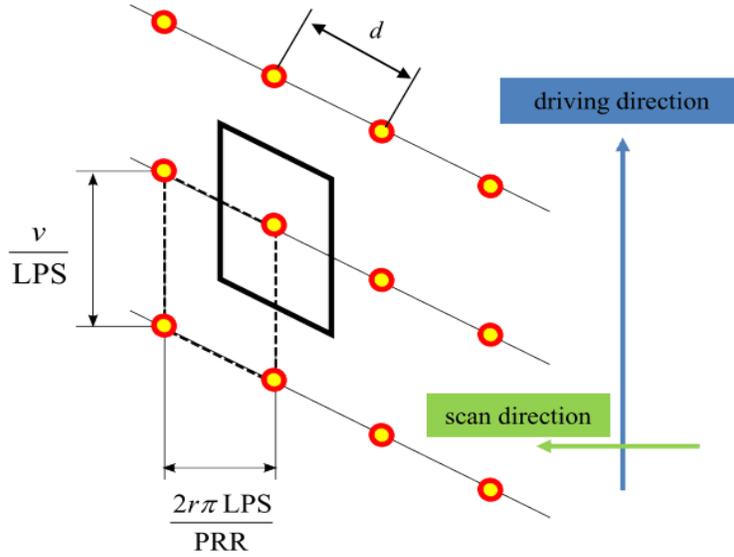


FIGURE 2.25 – Illustration du mécanisme de scan lidar sur un plan vertical lors d’une acquisition en mode dynamique (Rieger et al., 2010).

En remplaçant d par ΔX dans l’équation 2.45, on peut démontrer que l’erreur de latence équivaut à la fréquence de balayage du scanneur :

$$\delta_{dt} = \frac{1}{LPS} \quad (2.47)$$

Pour un scanneur qui mesure 20 LPS, on peut détecter une erreur de latence de l’ordre de 50ms alors que pour un scanneur qui a une fréquence de 200 LPS, on peut détecter une erreur de latence de 5ms. On peut donc remarquer que cette latence affecte la position des points du nuage par rapport au temps. Une limitation de cette méthode est la présence d’erreurs causée par l’incertitude des bras de levier du SLM.

2.5.2 Latence lidar-IMU

La seconde méthode consiste à exciter l’IMU lors de l’acquisition pour obtenir des vitesses angulaires. Pour obtenir ces vitesses angulaires, les trois gyromètres doivent mesurer des rotations dans le temps. On cherche une latence sur l’orientation mesurée par l’IMU telle que décrite par Hughes Clarke (2003). Considérons la station d’acquisition suivante montrée à la figure (2.26). L’acquisition d’une ligne de scan par rapport à une surface plane est effectuée en demeurant immobile. Une légère rotation (positive et négative) en roulis générant une vitesse angulaire ω_1 est appliquée au SLM. Cette méthode à l’instar de l’ajustage statique des angles de visée ne nécessite pas des données en recouvrement. Elle est donc insensible aux erreurs des bras de levier et des angles de visée, car le SLM ne change pas de point de vue. Elle permet de

plus de supprimer le recours à une table tournante telle que proposée par Picard and Seube (2012).

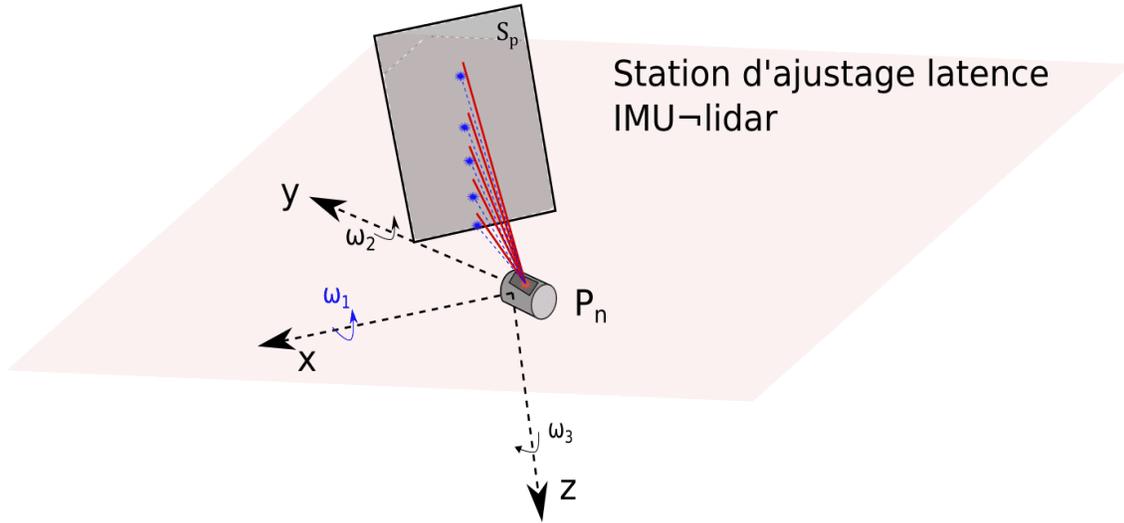


FIGURE 2.26 – Illustration du mécanisme d’acquisition en mode statique pour l’ajustage de la latence IMU-lidar

Dénotons par $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ les vitesses angulaires associées respectivement aux axes (X, Y, Z) NED du SLM de la figure (2.26). La latence IMU-lidar produit des ondulations au niveau de la ligne de scan dont l’amplitude est grande au niveau des faisceaux extrêmes. L’ajustage des points X_n sur la surface plane S_p en faisant varier le paramètre dt permet de corriger cet effet papillon (figure 2.27) que l’on aperçoit sur la ligne de scan géoréférencée. Les points associés à une vitesse angulaire maximale et une accélération faible sont utilisés pour l’ajustement (Keyetieu et al., 2018). Selon Picard and Seube (2012), il est préférable que les vitesses angulaires soient déterminées par une source de rotation externe (table tournante) à l’IMU, car celles-ci sont soumises à la même latence que l’on cherche à estimer. Les vitesses angulaires $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ sont supposées constantes lors du calcul (c’est-à-dire que la latence de l’IMU est nulle). La méthode proposée permet d’éliminer les coûts dispendieux rattachés à cet instrument et permet d’appliquer une procédure in situ. Le terme $C_{bI}^n(t - dt_{LI})$ à l’équation 2.44 peut s’exprimer de la manière suivante :

$$C_{bI}^n(t - dt_{LI}) = C_{bI}^n(t) - dt \Omega_{n/bI}^{bI} C_{bI}^n \quad (2.48)$$

- $\Omega_{n/bI}^{bI}$ est la matrice antisymétrique contenant les vitesses angulaires. $-dt \Omega_{n/bI}^{bI} C_{bI}^n$ est la correction angulaire appliquée au modèle mathématique pour corriger l’erreur d’orientation des points X_n . Ce terme est nul dans la première méthode, car la vitesse est linéaire.

Considérant Δ_n le vecteur de déplacement entre le point X_n appartenant au plan et son binôme \widetilde{X}_n perturbé par latence, dt s'exprime comme suit :

$$dt = \frac{\|\Delta_n\|}{\|\Omega_{n/bI}^{bI} \wedge \widetilde{X}_n\|} \quad (2.49)$$

$\Omega_{n/bI}^{bI}$ s'exprime par :

$$\begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_2 z - \omega_3 y \\ \omega_3 x - \omega_1 z \\ \omega_1 y - \omega_2 x \end{pmatrix} \quad (2.50)$$

La forme matricielle de l'équation 2.50 devient :

$$\Omega \wedge X = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_3 & \omega_2 \\ \omega_3 & 0 & -\omega_1 \\ -\omega_2 & \omega_1 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.51)$$

Connaissant dt et Ω , on calcule la matrice de micro-rotation pour l'erreur de mesure de l'IMU C_{bI}^n :

$$C_{bI}^n = C_{bI}^n(dt \times \omega_1, dt \times \omega_2, 0) \quad (2.52)$$

L'erreur sur l'axe de lacet est non significative selon Hughes Clarke (2003). Les données affectées d'une latence dont l'ordre de grandeur est d'environ ± 10 ms sont en général bonnes d'après l'auteur. Les vitesses angulaires sont en degrés par seconde ($^\circ/s$) et la latence en milliseconde (ms).

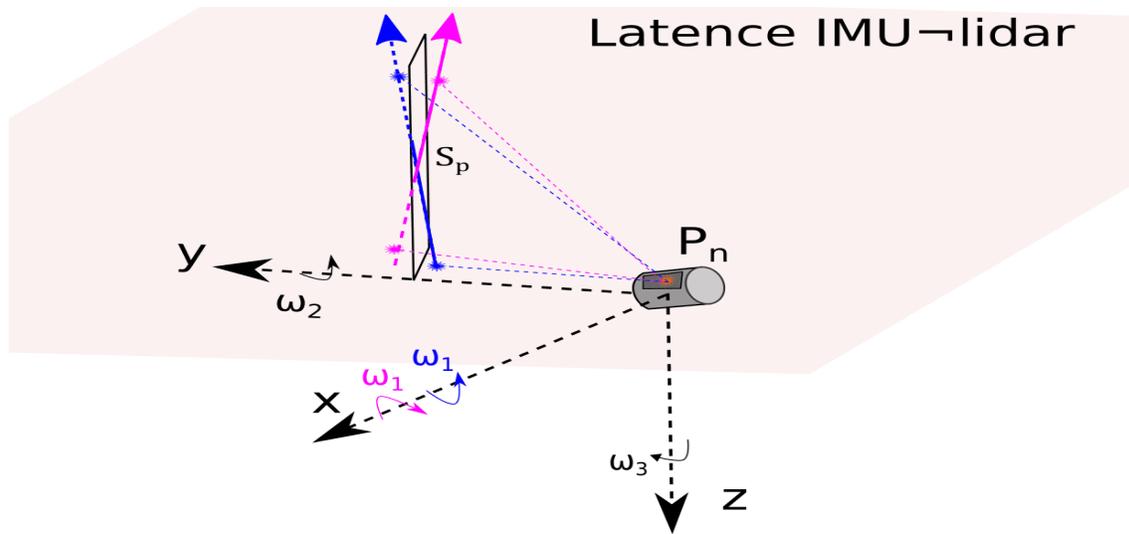


FIGURE 2.27 – Mésalignement de l’orientation de la ligne de scan causé par la latence IMU-lidar

Tel que vu dans cette section, ΔX et Δn sont observables visuellement, mais il faudrait pouvoir déterminer leur valeurs par une méthode itérative d’ajustement par moindres carrés. Le temps associé aux angles de navigation ainsi qu’à la vitesse propre et aux vitesses angulaires du SLM est fourni par la sortie du système d’orientation et de position (fichier SBET). Par conséquent, ce fichier doit subir l’ajustement de latence et des erreurs angulaires avant d’être utilisé pour le géoréférencement. Les fonctions et programmes énumérés dans cette section sont décrits à l’annexe D1.

2.6 Ajustage du biais de portée d’un scanneur 2D

L’exactitude d’un SLM dépend aussi de l’angle d’incidence et de la longueur de la distance mesurée (Cassol, 2018). L’incertitude de la mesure dépend de trois facteurs dont la vitesse de rotation du scanneur, la température interne et l’intensité du signal de retour (Heinz et al., 2018; Leslar et al., 2016). Le défaut de mesure de la portée du scanneur est un paramètre intrinsèque au capteur lidar. Cela s’explique par une non-conformité de l’exactitude de la mesure par rapport aux spécifications du fabricant. En pratique, ce biais est déterminé lors d’un procédé d’ajustage en laboratoire qui consiste à comparer la valeur réelle d’une grandeur connue à la valeur observée par le scanneur (Graefe, 2007; Landry, 2017). Dans l’optique de s’écarter de toute procédure en laboratoire et de montrer qu’il est possible d’évaluer la justesse des mesures de distances du SLM à partir d’un workflow d’opérations terrain, la méthode proposée sera effectuée à l’extérieur.

Les approches d’ajustage des SLMs basées sur des plans permettent de déterminer l’erreur

intrinsèque du scanneur ou d'analyser ses performances (Heinz et al., 2016). En utilisant une station totale qui est un instrument très précis pour faire de la topométrie et de la géodésie, une comparaison relative des distances mesurées entre deux plans avec une incertitude subcentrimétrique permettra de vérifier la justesse du SLM. Pour ce faire, deux sites d'expérimentation sont proposés :

Le premier site est entre deux tours voisines d'une hauteur de 50m. En faisant un levé en mode statique, on recueille une ligne de scan qui est symétrique et dont les points géoréférencés serviront à estimer la distance entre les tours. Cette distance sera comparée à la distance obtenue par une station totale. La figure (2.28) montre le principe. La distance approximative entre ces deux bâtiments est de 70m.

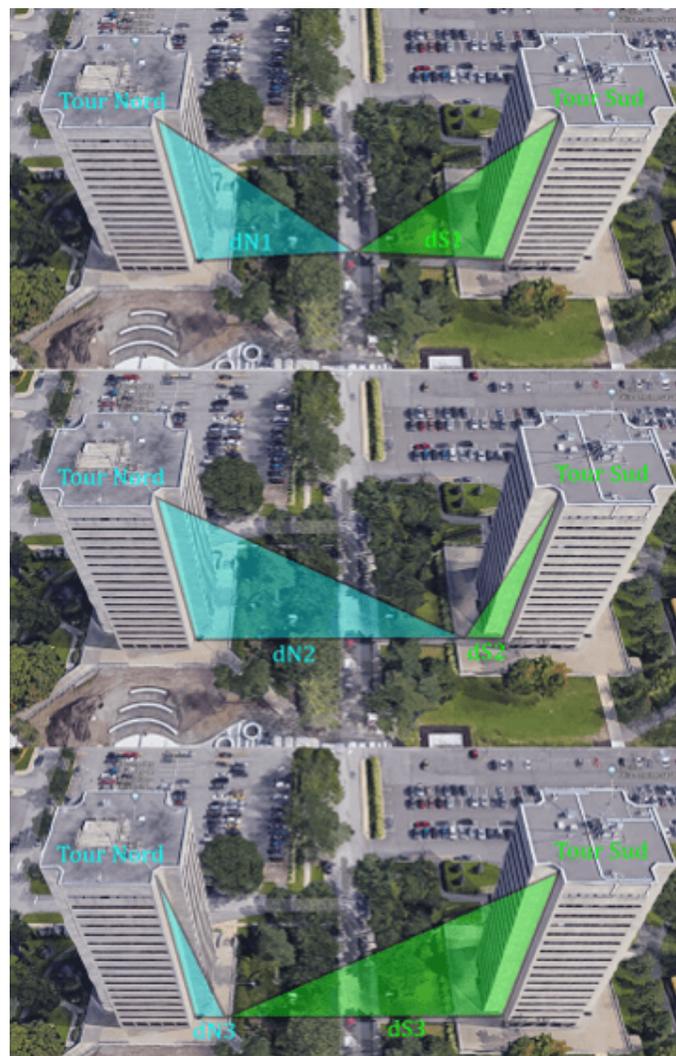


FIGURE 2.28 – Site d'analyse des performances du SLM situé entre les deux tours de l'Université Laval. À droite, Pavillon Félix-Antoine Savard et à gauche, Pavillon de la Faculté des Sciences de l'éducation.

Trois stations statiques sont prévues :

1. Une station à mi-portée (45m) entre les deux tours ;
2. Une station rapprochée d'environ 10m de la tour Sud ;
3. Une station rapprochée d'environ 10m de la tour Nord.

Le deuxième site présente la même configuration que le premier, mais avec des distances plus courtes entre les deux murs (figure 2.29). La distance entre les deux murs est d'environ 25m. Cette différence de longueur entre les deux sites permettra de vérifier en même temps la présence d'un facteur d'échelle lié au biais de portée du scanneur. Une seule position arbitraire entre les deux murs sera considérée pour effectuer une comparaison des distances entre le SLM et la station totale sur ce deuxième site.

Pour ce site, quatre vitesses de rotation (LPS) du scanneur sont prévues pour chaque station statique :

1. 5 LPS ;
2. 10 LPS ;
3. 15 LPS ;
4. 20 LPS ;

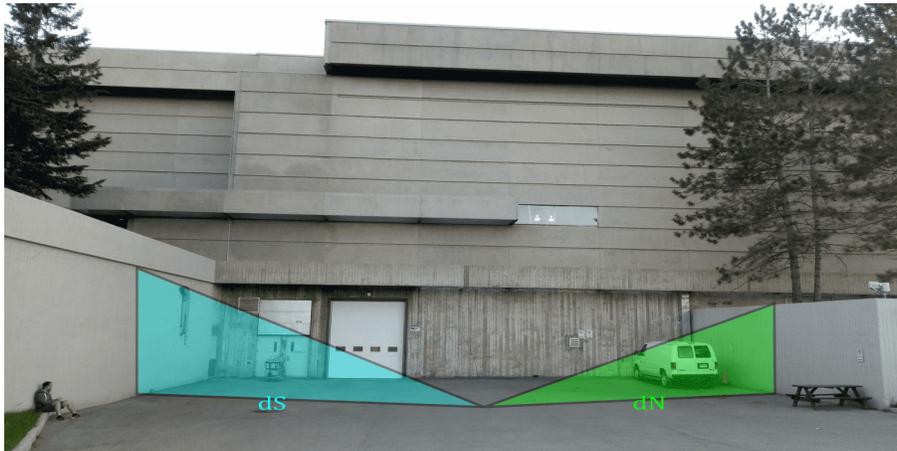


FIGURE 2.29 – Site d'analyse des performances du scanneur situé à l'entrée du pavillon de métrologie et de géodésie de l'Université Laval. Pavillon d'éducation physique et sportive PEPS.

2.7 Critères de validation des résultats

Selon Heinz et al. (2016), l'évaluation des résultats d'une méthode d'ajustage des angles de visée doit se baser sur l'incertitude des paramètres estimés et leur corrélation, la fiabilité

interne des observations (redondance), la sensibilité des plans envers les paramètres, et l'efficacité (nombre minimal de plans et de stations nécessaire pour assurer la répétabilité des résultats). Lors de l'analyse des résultats au chapitre 4, ces indicateurs nous permettront de commenter les performances réalisées à l'aide de la méthode d'ajustage implémentée. Pour compléter cette validation de manière plus exhaustive, les critères suivants seront aussi évalués :

1. Application des angles de visée déterminés par ajustage sur les lignes de scan ayant servi à l'ajustage statique et détermination d'une nouvelle solution d'angles de visée ;
2. Comparaison relative, nuage à nuage, des plans issus du même recouvrement pour le SLM ;
3. Comparaison absolue, nuage à nuage, des plans mesurés par la station totale par rapport au SLM.

2.7.1 Estimation d'une nouvelle solution par rétro ingénierie

Pour déterminer les angles de visée par ajustement aux moindres carrés, des valeurs approchées de bonne qualité doivent être fournies par l'utilisateur. Lorsque la solution converge, le nombre d'itérations dépend de la qualité des valeurs approchées. Lorsqu'on fournit des valeurs approchées au voisinage des inconnues à estimer, une seule itération est nécessaire et l'écart entre les valeurs approchées de très bonne qualité et les valeurs estimées est proche de 0.

D'autre part, tel que vu à la section 3.3, un défaut d'alignement des angles de visée crée une erreur de portée. Toutefois, on peut quantifier cette erreur de portée sur les retours lidar. En appliquant les angles de visée déterminés par ajustage sur les lignes de scan ayant servi à l'ajustage statique (points X_n géoréférencés), on peut calculer par rétro-ingénierie les retours lidar dans le repère bS à partir des points X_n . Les vecteurs directeurs seront ainsi recalculés en connaissance des angles de visée. Normalement, ces vecteurs sont orthogonaux à la normale au plan sans erreur. Par conséquent, en relançant l'ajustement, les angles de visée estimés sont nuls ou presque (en tenant compte du bruit des mesures, car on utilise cette fois-ci les points X_n qui seront transformés en r_{bS}). En effectuant ces tests, il sera possible de valider que la méthode d'ajustement produit de bons résultats et que la méthode d'ajustement aux moindres carrés est robuste.

2.7.2 Analyse des performances d'un SLM après application des paramètres d'ajustage déterminés

Une comparaison relative nuage à nuage des plans issus du même recouvrement pour le SLM permet aussi de valider les résultats obtenus. Dans un premier temps, l'ajustage des angles de visée sera réalisé à l'aide du patron de lignes déterminé. Deuxièmement, le patron de lignes suggéré par Keller and Sternberg (2013) sera utilisé pour acquérir des nuages de points en

mode dynamique qui serviront à détecter la présence d’erreurs systématiques causées par le mésalignement des angles de visée. Troisièmement, une application des paramètres d’ajustage déterminés lors du géoréférencement des nuages de points permettra d’évaluer la cohérence des nuages de points dans les zones de recouvrement. On s’attend à une diminution des écarts entre les plans, car les erreurs systématiques ont été modélisées. D’après Rieger et al., (2010), les nuages de points représentant le même plan devraient se superposer de manière uniforme lorsque l’estimation des angles de visée est juste.

Pour calculer l’écart entre les plans, il faut d’abord extraire les points X_n représentant ces plans. Par la suite, on effectue un ajustement des points pour obtenir la meilleure estimation du plan passant par ces points. Pour ce faire, plusieurs techniques numériques sont envisageables, notamment les moindres carrés de Deming (Moniot, 2009) et les moindres carrés par variation de paramètres (Cocard, 2017). Des solutions similaires sont aussi intégrées dans les logiciels de traitement des nuages de points. Dans ce mémoire, le logiciel Trident a été utilisé pour effectuer le calcul des distances orthogonales entre les plans à des fins de comparaison de différentes solutions d’ajustage. Le logiciel open source CloudCompare offre aussi la méthode Ransac (Fischler and Bolles, 1981) pour ajuster un plan sur un semi de points. Ce logiciel a aussi été utilisé pour effectuer une comparaison nuage à nuage avec l’outil ”Cloud2cloud Distance”. Ces traitements seront discutés au chapitre 3.

Le calcul d’une distance orthogonale entre un nuage de points et un plan se fait comme suit : Soit P un point du voisinage du plan dans le nuage de points comparé de coordonnée x_0, y_0, z_0 et Sp la surface plane de référence définie par A, B, C, D. Pour chaque point, du nuage comparé :

$$\Delta_{Sp} = \frac{|Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad (2.53)$$

2.7.3 Comparaison avec des données de référence acquises avec scanner lidar terrestre

L’exactitude relative est indépendante des conditions GNSS (multitrajets, perte de signal, etc.). Dans la comparaison en mode absolu, on tient compte de la qualité du posttraitement des données de navigation. Cela permet d’évaluer la fiabilité du SLM en termes de mesure dans un système de coordonnées global. En supposant qu’il n’y a pas d’erreur de géoréférencement (Barber et al., 2008 et Haala et al., 2008), les nuages de points issus de techniques de mesure différentes doivent être cohérents. L’utilisation d’une station totale équipée d’un scanner lidar a permis d’acquérir des nuages de points rattachés directement au canevas géodésique (points d’appui déterminés par un levé géodésique GNSS) établi sur le campus de l’Université Laval. Les données collectées et les traitements effectués sont discutés dans le chapitre suivant.

Chapitre 3

Acquisition et traitement des données lidar mobile

Dans le chapitre précédent, le plan d'acquisition des données pour l'ajustage d'un SLM a été présenté. Pour entamer ce chapitre, une brève description des sites choisis sur le campus de l'Université Laval est réalisée. Par la suite, le SLM utilisé est présenté. Celui-ci a servi à la collecte des données réelles sur les différents sites d'ajustage proposés. Finalement, une description détaillée des étapes de traitement des données permet de présenter les calculs nécessaires au formatage des données utilisées pour l'ajustage.

3.1 Description du flux d'opérations

La figure (3.1) présente une vue aérienne du campus de l'Université Laval sur lequel les travaux de ce projet de maîtrise se sont déroulés. Au total, 5 sites ont été choisis pour mettre en place la méthodologie présentée. Ces sites ont été utilisés comme suit :

- Site 1 (bleu) est le site d'ajustage des angles de visée. Le choix idéal doit être porté sur une surface lisse (pour réduire le bruit des observations lidar) et plane (pour obtenir des vecteurs coplanaires). Un mur de 18m de haut situé à l'entrée de l'aile nord du Pavillon Casault a été utilisé. Ce mur (figure 3.2) est construit d'un matériau de granite étant une surface de bonne planéité. Ce site a aussi été utilisé pour appliquer la méthodologie proposée pour détecter la latence IMU-lidar.
- Site 2 (vert) est le site utilisé pour analyser les performances après application des résultats obtenus par ajustage des angles de visée et du biais de portée. Il représente la façade principale du Casault et sa façade nord attenante. Ce bâtiment a été privilégié, car il se caractérise par plusieurs surfaces avec des orientations différentes. À la figure (3.3), on peut voir qu'en plus des plans qui seront parallèles à la trajectoire, on a des plans rasants et des plans inclinés (pente d'environ 30°). L'efficacité des résultats

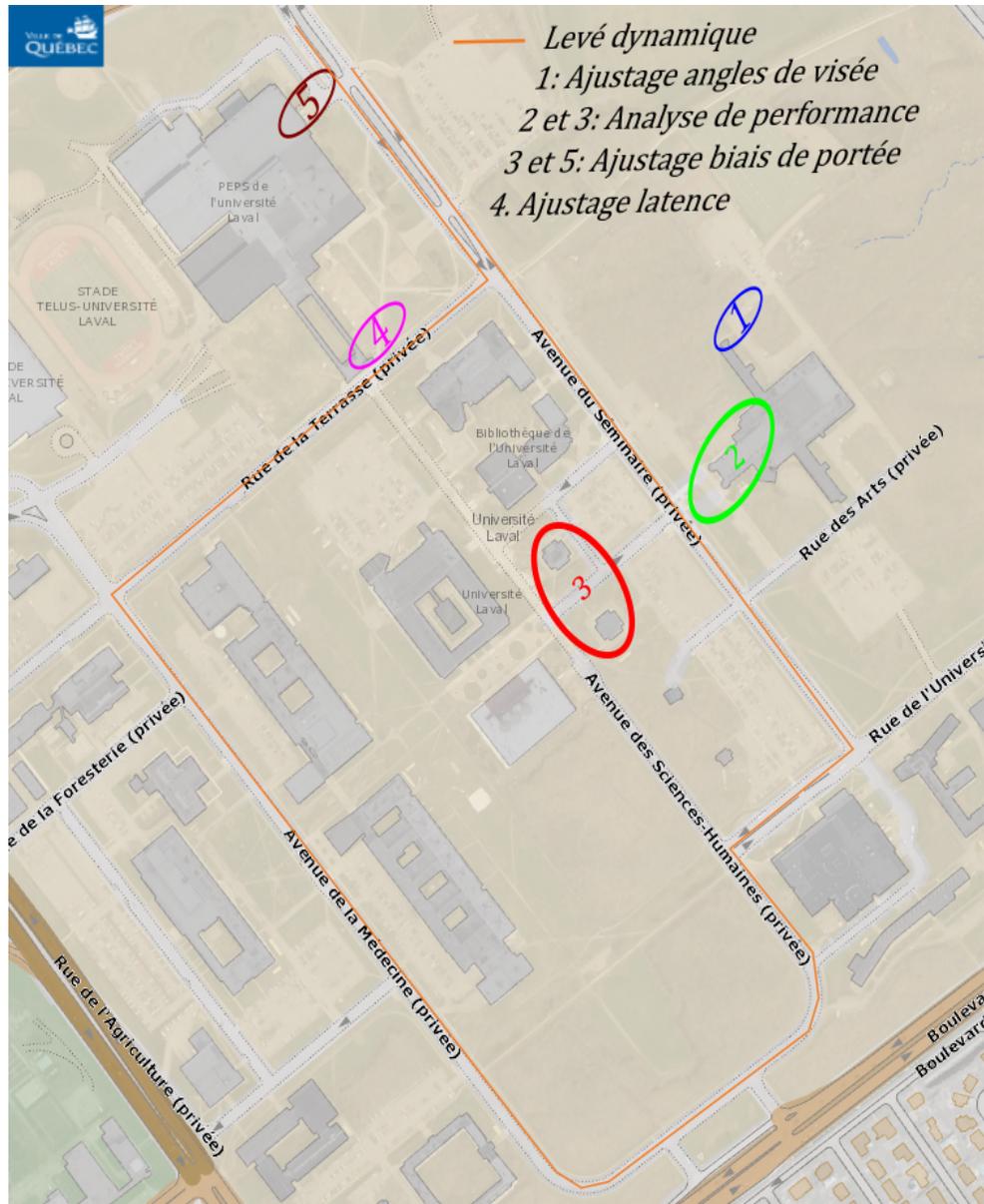


FIGURE 3.1 – Vue aérienne du campus de l'Université Laval. Les cinq sites choisis pour l'acquisition des différents jeux de données requis dans ce projet de maîtrise. Ces sites sont localisés respectivement au Casault (1) et (2), entre les deux tours FSE et FAS (3), sur la rue de la Terrasse(4) et au PEPS (5).

obtenus par ajustage doit s'évaluer sur des plans présentant différentes orientations. Cela permet de confirmer que ceux-ci sont bien cohérents avec les recouvrements observés sur les différents plans. En effet, les angles de visée déterminés représentent une correction globale du nuage de points à tous les endroits pour lesquels les erreurs systématiques sont détectables.



FIGURE 3.2 – Site 1 : mur nord du Pavillon Casault utilisé pour l’ajustage des angles de visée.



FIGURE 3.3 – Site 2 : façade principale et mur du côté nord du Pavillon Casault présentant des plans avec des orientations rasantes et inclinées qui seront utilisés pour l’analyse de performances des résultats obtenus par ajustage des angles de visée.

- Site 3 (rouge) est montré aux figures (2.28 et 3.4). Deux murs espacés d’une distance de 70 mètres sont utilisés pour vérifier la justesse des mesures du SLM. Comme pour le site 2, une analyse des performances est effectuée sur les plans pour illustrer l’effet des angles de visée combiné à la rasance lorsque le bâtiment est très haut. Ce site a aussi

été utilisé pour appliquer la méthodologie proposée pour détecter la latence IMU-lidar.



FIGURE 3.4 – Site 3 : façade de la tour Sud. Les plans entre les rangées de fenêtres seront utilisés pour mener une analyse de performances.

- Site 4 (magenta) est composé de trois plans rasants qui permettront d’appliquer la méthodologie proposée pour détecter la latence POS-lidar. Il est montré à la figure (3.5). Ces surfaces ont une superficie d’environ $8m^2$. Le parcours est caractérisé d’une pente d’environ 6% entre le premier plan (éloigné) et le troisième plan (proche).



FIGURE 3.5 – Site 4 : plans servants à détecter la latence POS-lidar situés sur la rue de la Terrasse. Ces plans seront scannés à différentes vitesses. Un chariot sera utilisé, car le site est inaccessible en voiture.

- Site 5 (marron) est montré à la figure (2.29). Ce site sera utilisé notamment pour analyser les performances du scanneur. Une ligne de scan sera balayée entre deux murs distancés

d'environ 25m.

3.1.1 SLM Trimble MX2

Le SLM utilisé est le modèle "MX2 Single Head" (figure 3.6). Ce système compact est équipé d'un scanner laser 2D modèle "Dynascan S250" du fabricant Renishaw (Trimble, 2013b). La portée maximale est de 250m avec une fauchée de 360°. La centrale inertielle est un système hybridé AP20+IMU42 du fabricant Applanix couplé à une antenne GNSS primaire modèle "ZEPHYR 2" formant ainsi un système d'orientation et de position POS LV 220. Ce système d'orientation permet d'achever une géoréférence directe des observations du SLM. L'annexe A1 présente les performances pouvant être obtenues en mode de positionnement RTK ou DGPS. Une antenne GNSS secondaire est aussi nécessaire pour la détermination de l'azimut vrai par la méthode GAMS (GNSS Azimuth Measurement System)(Trimble, 2013a). Ce système est aussi équipé d'une caméra Ladybug 3 du fabricant PointGrey Research. Le tableau (3.1) présente les performances typiques du SLM lors d'un levé sans coupure du signal GNSS.



FIGURE 3.6 – Système lidar mobile Trimble MX2 *single head* monté sur le rack installé sur le toit d'un véhicule.

TABLEAU 3.1 – Performances du Trimble MX2 en RMS (Root Mean Square)*, Applanix (Trimble, 2013a)

Mode d'observations		SPS (code C/A)	Post traitement **(L1/L2)
GNSS	XYZ	1.5-3m	0.02-0.05m
INS	φ/θ	0.03°	0.015°
	ψ	0.05°	0.025°
INS (sans GAMS)	ψ	0.20°	0.050°

* Les performances indiquées dans ce tableau peuvent varier en fonction de la géométrie des satellites et des conditions atmosphériques. L'utilisation du DMI est prise en compte pour

obtenir ces résultats.

** Les performances pour les observations posttraitées sont obtenues en utilisant le logiciel POSpac MMS. Dans le cas d'une seule antenne GNSS, les performances observées pour l'angle d'attitude en lacet sont 5 à 10 fois moindres. Les angles de roulis et de tangage demeurent du même ordre de grandeur spécifié au tableau après 10 minutes d'alignement fin. Les performances du positionnement GNSS après posttraitement sont en accord avec les valeurs du tableau. Pour la suite, on suppose que ces écarts sont causés par l'absence d'utilisation d'un DMI.

Le SLM utilisé lors de ce projet n'est pas équipé d'un DMI. Le mode SPS, aussi appelé système de positionnement standard, a été utilisé pour les observations GNSS. En utilisant une seule antenne GNSS dans ces conditions, les performances observées pour l'angle d'attitude en lacet sont 4 à 5 fois moindres après 10 minutes d'alignement fin. Les incertitudes des angles de roulis et de tangage demeurent dans le même ordre de grandeur que celles spécifiées au tableau (3.1).

Le tableau (3.2) présente les paramètres de montage du SLM lors de l'intégration des capteurs (scanneur, IMU). Les translations entre l'antenne GNSS et l'IMU sont calibrées par Pospac lors du posttraitement des données de navigation pour fournir la meilleure estimation de ces valeurs. Un croquis des distances et des angles de montage ainsi que les axes des repères des trois principaux capteurs est joint à l'annexe A2. Sur ce croquis, on peut remarquer que le centre de mesure de l'IMU est l'origine du repère bI qui est fixe. Ce repère est orienté selon le système NED. Le scanneur étant monté à l'arrière de celui-ci avec un décalage vertical vers le haut, on peut donc déduire les bras de levier présentés au tableau (3.2). L'axe z_{bS} du scanneur pointe dans le sens contraire de l'axe x_{bI} on peut donc déduire que celui-ci est monté à 180° en lacet par rapport à l'IMU. Les capteurs sont alignés selon l'axe longitudinal (avant du véhicule), ce qui explique les orientations relatives de roulis et de tangage nulles. En réalité, le manque de connaissances des angles de visée qui complètent ces orientations est la problématique qu'on étudie lors du traitement des données.

TABLEAU 3.2 – Paramètres d'ajustage MX2 convention NED

Alignements IMU-lidar	Valeur	Incertitude	
Orientations relatives	φ_{b^*}	0°	-
	θ_{b^*}	0°	-
	ψ_{b^*}	180°	-
Latence	dt	-	-
Bras de levier	a_x	-0.244	1mm
	a_y	0.000	1mm
	a_z	-0.052	1mm

3.1.2 Acquisition des données lidar mobile pour l'estimation des angles de visée

Telle que décrite au chapitre 2, l'optimisation des stations statiques a permis de déterminer les positions optimales des stations d'ajustage statique par rapport au plan afin de collecter une série minimale d'observations. Ces positions peuvent être représentées comme montrées à la figure (3.7). Nous avons donc un total de 6 positions par rapport au plan. Ceci représente un minimum de 6 stations pour observer les mésalignements en roulis, tangage et lacet du SLM.

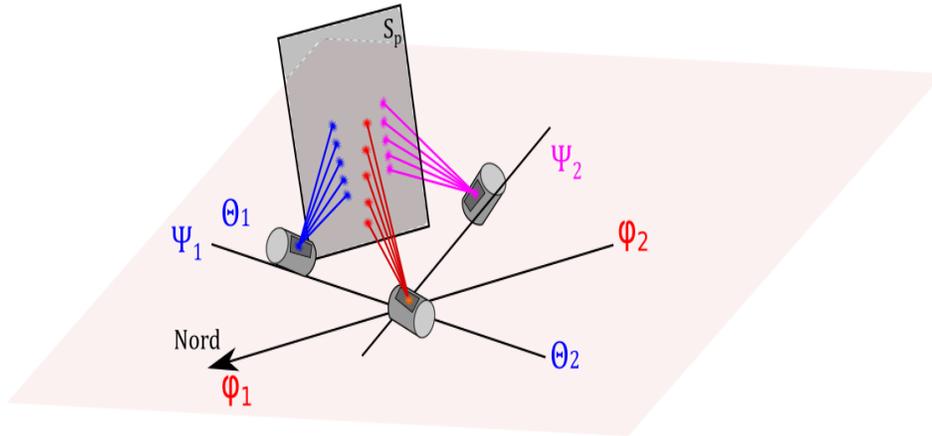


FIGURE 3.7 – Plan d'acquisition pour ajustage statique des angles de visée $\varphi_b, \theta_b, \psi_b$ d'un SLM.

Pour s'assurer d'obtenir des résultats répétables et fiables, on opte pour une redondance très grande (Landry, 2017). Pour ce faire, un patron de lignes de 36 stations a été utilisé en se basant sur les résultats de l'optimisation présentés au chapitre précédent. Ce patron de lignes est constitué des six positions principales montrées à la figure (3.7). Chaque position se caractérise par un lacet (ψ) défini, mais avec des angles de roulis (φ) et de tangage (θ) variables. En effet, comme déjà expliqué au chapitre précédent, il existe pour chaque angle de visée, un minimum de 10 stations offrant une observabilité optimale du mésalignement. En réduisant ce nombre à 6 afin de ne pas répéter plusieurs fois les mêmes stations, on peut déterminer une série de 36 stations (6 positions avec 6 stations optimales) pour le plan d'acquisition. Pour la suite, on nomme les deux positions données par les lignes de scan rouges par A et D, les deux positions données par les lignes de scan bleues par B et C, et les deux positions données par les lignes de scan magenta par E et F. Le croquis 3.8 permet de visualiser les stations par rapport au mur nord du Pavillon Casault en tenant compte de l'orientation du vrai nord.

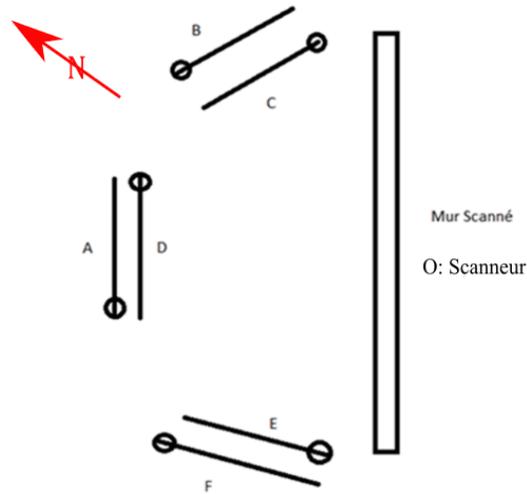


FIGURE 3.8 – Croquis des 6 positions pour la procédure d’acquisition de l’ajustage statique des angles de visée $\varphi_b, \theta_b, \psi_b$ (Casault).

Les tableaux (3.3, 3.4, 3.5) présentent le patron de lignes utilisé pour l’acquisition des données réelles avec le MX2.

TABLEAU 3.3 – Plan d’acquisition pour l’ajustage des angles de visée, Casault (Roulis)

Position A						
φ (°)	0	-45	0	-35	0	-45
θ (°)	0	0	45	45	-35	35
ψ (°)	48	48	48	48	48	48
Position D						
φ (°)	0	45	0	45	0	-45
θ (°)	0	0	45	35	-35	-35
ψ (°)	228	228	228	228	228	228

TABLEAU 3.4 – Plan d’acquisition pour l’ajustage des angles de visée, Casault (Tangage-Lacet)

Position B						
φ (°)	0	-45	0	-45	0	-45
θ (°)	0	0	35	35	-35	-35
ψ (°)	115	115	115	115	115	115
Position C						
φ (°)	0	45	0	45	0	-45
θ (°)	0	0	35	35	-35	-35
ψ (°)	295	295	295	295	295	295

TABLEAU 3.5 – Plan d’acquisition pour l’ajustage des angles de visée, Casault (Lacet)

Position E						
φ (°)	0	45	0	45	0	45
θ (°)	0	0	35	35	-35	-35
ψ (°)	346	346	346	346	346	346
Position F						
φ (°)	0	-45	0	-45	35	-45
θ (°)	0	0	35	35	-35	-35
ψ (°)	166	166	166	166	166	166

Au total, cinq journées d’expérimentation ont été effectuées. Le patron de lignes optimal de 16 stations, proposé au chapitre 3, a aussi été testé sur le terrain pour comparer l’efficacité du nombre de stations sur le résultat de l’estimation. Le tableau (3.6) présente les informations notées sur le terrain.

TABLEAU 3.6 – Carnet de notes des levés statiques pour l’ajustage des angles de visée

Date AAAA	DD MM	Début HH :MM :SS (UTC)	Fin (UTC) HH :MM :SS (UTC)	Durée HH :MM :SS	Nombre de sta- tions	Fréquence im- pulsion (Hz)	Taux d’échan- tillonnage IMU (Hz)
12	10	07 :42 :39	09 :10 :16	01 :27 :37	36	36000	200
17	05	02 :52 :25	05 :36 :13	02 :43 :48	36+16	36000	200
24	05	06 :13 :32	08 :01 :16	01 :47 :44	16	36000	200
12	06	06 :16 :45	08 :14 :57	01 :58 :12	36+16	36000	200
21	08	03 :02 :00	04 :53 :01	01 :51 :01	36+16	36000	200

* Lors de ce levé, deux antennes GNSS ont été utilisées.

L’acquisition des observations consiste en plusieurs étapes. Ces étapes sont décrites par le diagramme aux figures (3.9 et 3.10). Ce workflow d’opérations a été répété pour tous les jeux de données collectées lors de ce projet. Il est à noter que les angles d’attitude (roulis, tangage, lacet) varient d’en moyenne 10°. En effet, compte tenu de l’incertitude fournie par le POS en temps réel en mode SPS, il est difficile de répéter exactement les mêmes angles. Une fois les données récupérées, le traitement nécessaire pour formater les données est discuté à la section 4.2.

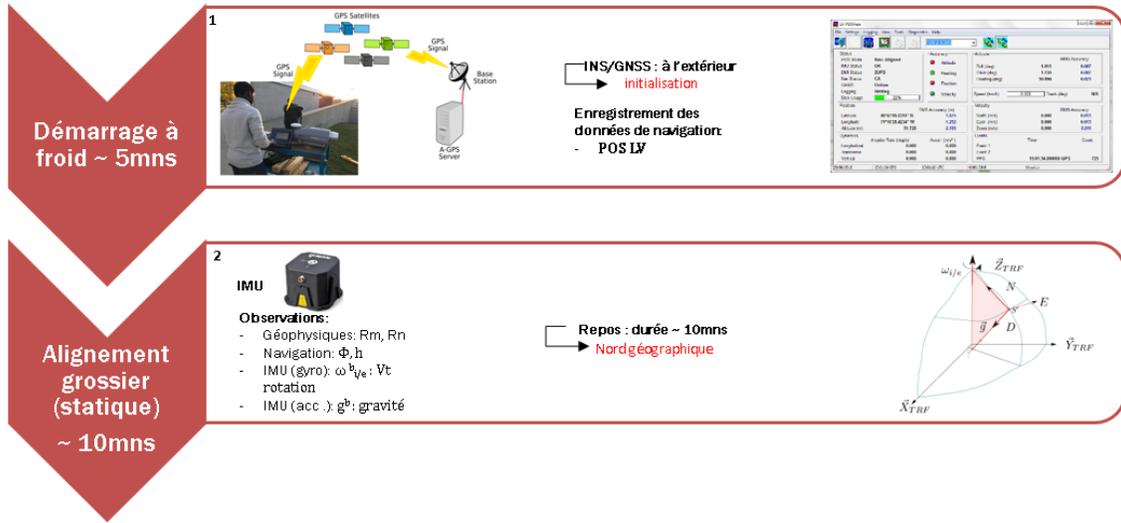


FIGURE 3.9 – Workflow d’opérations pour l’acquisition des données lidar mobiles SLM MX2 (partie 1).

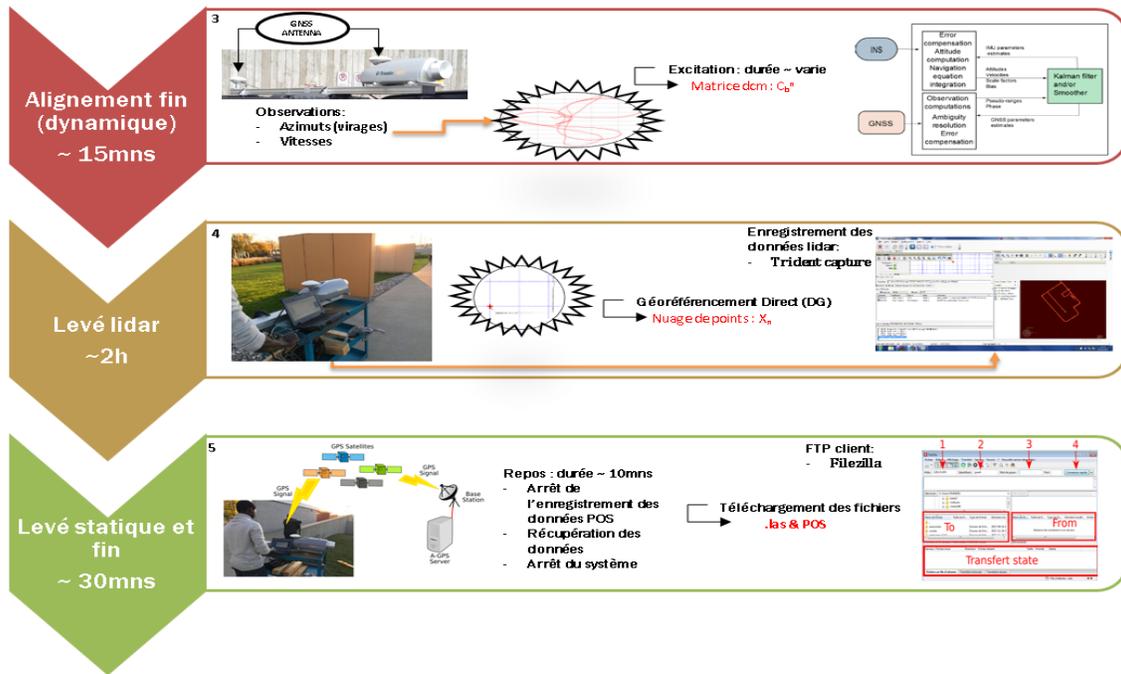


FIGURE 3.10 – Workflow d’opérations pour l’acquisition des données lidar mobiles SLM MX2 (partie 2).

Le tableau (3.7) présente les informations pouvant être extraites du carnet électronique du SLM (table 'Run' du fichier de base de données 'tridb'). Pour rappel, les observations néces-

saires à l'ajustage des angles de visée sont :

1. les vecteurs directeurs v_{bL}^i des lignes de scan de chaque position, soit un total de 36 ;
2. les angles d'attitude fournies par la matrice de cosinus directeur C_{bI}^n .

L'annexe B présente les observations brutes de la matrice de cosinus directeur C_{bI}^n qui ont été utilisées pour l'ajustement des angles de visée. L'annexe E1 présente des photos du montage et des exemples de stations lors des différentes dates de levé.

TABLEAU 3.7 – Données télémétriques observées lors des levés statiques pour l'ajustage des angles de visée

Date DD MM AAAA	Distance moyenne par- courue (km)	Résiduelles RMS° $\varphi/\theta/\psi$	Intensité du mur (0 1)	Fréquence ba- layage scanneur (Hz)	Durée d'en- registrement moyen (se- conde)
12 10 2017	2.94E 02	0.03/0.03/1	0.48 - 0.55	5	3.22
17 05 2018	1.88E 04	0.0223/0.022/0.798	0.48 - 0.55	5	4.43
24 05 2018	1.76E 04	0.025/0.025/0.925	0.48 - 0.55	5	4.75
12 06 2018	2.54E 04	0.023/0.023/0.962	0.48 - 0.55	5	4.14
21 08 2018*	3.35E 04	0.028/0.028/0.242	0.48 - 0.55	5	5.11

3.1.3 Acquisition des données lidar mobile pour l'estimation de la latence

La figure (3.11) présente un croquis du levé qui a été effectué au site 4 le 24-05-2018. Lors de ce levé, 6 passages ont été effectués à différentes vitesses. Parmi ceux-ci deux passages ont été sélectionnés. Seuls les plans S2 et S3 ont été utilisés pour faire des calculs, car il n'y avait pas assez de recouvrement au plan S1 et celui-ci était très proche de la phase d'accélération alors que la vitesse n'est pas constante.

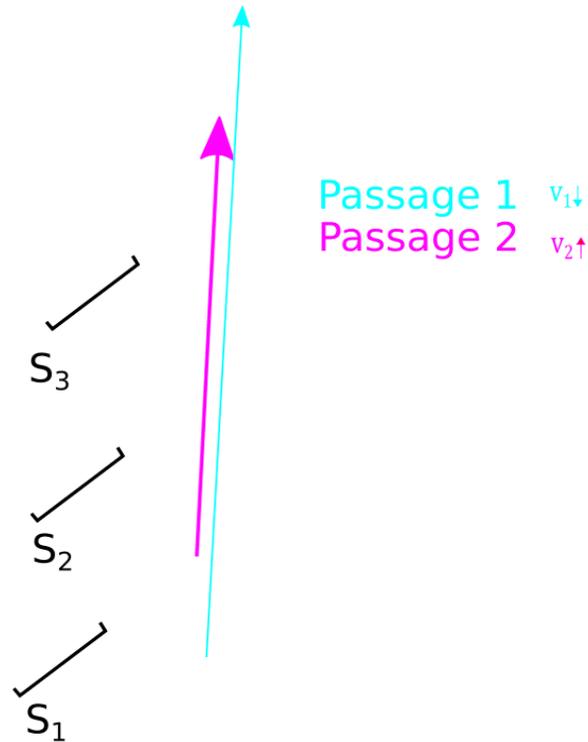


FIGURE 3.11 – Levé lidar mobile pour latence POS-lidar

Le tableau (3.8) présente les informations notées sur le terrain.

TABLEAU 3.8 – Carnet de notes du levé dynamique pour l’ajustage de latence POS-lidar

Date DD-MM-AAAA	Début HH :MM :SS (UTC)	Fin (UTC) HH :MM :SS (UTC)	Durée HH :MM :SS	Nombre de passages	Fréquence impulsion (Hz)	Taux d’échantillonnage IMU (Hz)
24-05-2018	08 :03 :17	08 :48 :13	00 :44 :56	6	36000	200

Le tableau (3.9) présente les informations pouvant être extraites du carnet électronique du SLM (table 'Run' du fichier de base de données 'tridb').

TABLEAU 3.9 – Données télémétriques observées : 24-05-2018

Données lidar	Distance parcourue (km)	Vitesse moyenne (m/s)	Intensité des plans S2-S3 (0-1)	Fréquence balayage scanneur (Hz)	Durée d’enregistrement (seconde)
VanRecord(1)	0.02	2.39	0.35-0.52	10	9.55
VanRecord(3)	0.03	2.56	0.35-0.52	10	10.35

Des données ont été collectées le 29-05-2018 (Site 1) et le 15-06-2018 (Site 3) pour détecter la

latence IMU-lidar. L'annexe E2 présente des photos du levé POS-lidar et du montage IMU-lidar. Lors du levé du 29-05-2018, l'angle de rotation en roulis est demeuré constant et la position du scanneur a été déplacée par rapport au mur. Pour celui du 15-06-2018, l'angle de rotation a été modifié et la position du scanneur est demeurée constante.

TABLEAU 3.10 – Carnet de notes du levé statique pour l'ajustage de latence IMU-lidar

Date DD-MM-AAAA	Début HH:MM:SS (UTC)	Fin (UTC) HH:MM:SS (UTC)	Durée HH:MM:SS	Nombre de stations	Fréquence impulsion (Hz)	Taux d'échantillonnage IMU (Hz)
29-05-2018	10 :51 :25	11 :50 :28	00 :59 :03	7	36000	200
15-06-2018	08 :54 :09	10 :01 :18	01 :07 :09	8	36000	200

TABLEAU 3.11 – Données télémétriques observées : 29-05-2018

Données lidar	Distance moyenne parcourue (km)	Distance par rapport au mur	Angle de rotation en Roulis (deg)	Fréquence balayage scanneur (Hz)	Durée d'enregistrement moyen (seconde)
VanRecord(0)	1.45E-03	2m	0	5	69.35
VanRecord(1)	3.55E-03	2m	± 10	5	18.05
VanRecord(2)	1.47E-03	5m	0	5	68.30
VanRecord(3)	3.10E-03	5m	± 10	5	18.05
VanRecord(4)	1.34E-03	10m	0	5	61.50
VanRecord(5)	2.73E-03	10m	± 10	5	18.05
VanRecord(6)	3.58E-03	10m	± 10	5	18.10

TABLEAU 3.12 – Données télémétriques observées : 15-06-2018

Données lidar	Distance moyenne parcourue (km)	Distance par rapport au mur (m)	Angle de rotation en Roulis (deg)	Fréquence balayage scanneur (Hz)	Durée d'enregistrement moyen (seconde)
VanRecord(0)	2.88E-03	35	0	10	140.45
VanRecord(1)	4.80E-04	35	± 2	10	22.40
VanRecord(2)	2.17E-03	35	± 4	10	44.90
VanRecord(3)	1.52E-03	35	± 6	10	47.75
VanRecord(4)	4.00E-03	35	± 8	10	56.85
VanRecord(5)	1.33E-02	35	± 35	10	67.55
VanRecord(7)	8.19E-03	35	± 10	10	50.35
VanRecord(8)	2.35E-03	35	± 10	10	37.30

3.1.4 Acquisition des données lidar mobile pour l'estimation du biais de portée

Pour l'acquisition des données lidar mobile du 16-05-2018 entre les deux tours au site 3, les étapes 1 à 3 du workflow d'opération ont été complétées. À l'étape 4, la collecte des données s'est effectuée à cinq endroits principaux. Seuls trois jeux de données ont été utilisés pour effectuer l'analyse de performances. La figure (3.12) présente les trois positions du SLM pour ces trois séries. La direction du SLM pointe vers l'est. Les tableaux (3.13 et 3.14) présentent les informations pertinentes sur le levé.

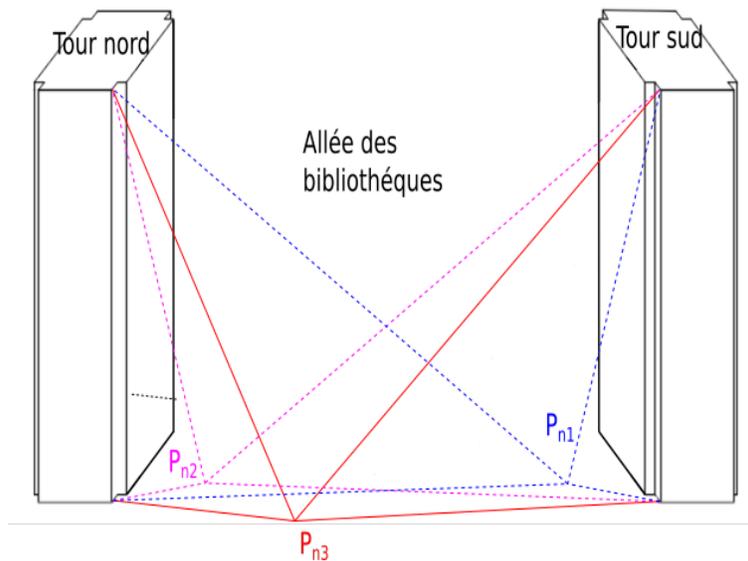


FIGURE 3.12 – Levé lidar mobile statique entre les deux tours (Crédit : Cassol,2017).

TABLEAU 3.13 – Carnet de notes du levé statique pour le biais de portée (Site 3)

Date DD-MM-AAAA	Début HH:MM:SS (UTC)	Fin (UTC) HH:MM:SS (UTC)	Durée HH:MM:SS	Nombre de stations	Fréquence impulsion (Hz)	Taux d'échantillonnage IMU (Hz)
16-05-2018	07:44:03	09:45:28	02:01:25	5	36000	200

La même procédure a été réalisée au site 5 le 20 août 2018, mais cette fois-ci en utilisant 2 antennes GNSS pour comparer les performances du POS par rapport au site 3. L'annexe E3 présente les photos du montage lors de l'acquisition. Les données relatives à l'acquisition des nuages de points sont présentées au tableau (3.16). Le tableau (3.15) présente les informations du carnet de notes.

TABLEAU 3.14 – Données télémétriques observées : 16-05-2018

Données lidar	Distance moyenne parcourue (km)	Distance par rapport aux tours N-S (m)	Position	Fréquence balayage scanneur (Hz)	Durée d'enregistrement moyen (minute)
VanRecord(1)	2.01E-05	63-7	Pn1	5	17.9
VanRecord(2)	1.52E-06	7-63	Pn2	5	2.6
VanRecord(3)	9.96E-06	25-45	Pn3	5	2.7

TABLEAU 3.15 – Carnet de notes du levé statique pour le biais de portée (Site 5)

Date DD-MM-AAAA	Début HH :MM :SS (UTC)	Fin (UTC) HH :MM :SS (UTC)	Durée HH :MM :SS	Nombre de stations	Fréquence impulsion (Hz)	Taux d'échantillonnage IMU (Hz)
20-08-2018*	09-18-39	09 :45 :28	01 :41 :44	14	36000	200

TABLEAU 3.16 – Données télémétriques observées : 20-08-2018

Données lidar	Distance moyenne parcourue (km)	Distance par rapport aux murs dN dS (m)	Position	Fréquence balayage scanneur (Hz)	Durée d'enregistrement moyen (seconde)
VanRecord(0)	8.33E-04	12-10	Pn	5	23.55
VanRecord(1)	2.29E-03	12-10	Pn	10	25.55
VanRecord(2)	6.57E-04	12-10	Pn	15	23.50
VanRecord(3)	1.46E-03	12-10	Pn	20	23.10

3.1.5 Acquisition des données lidar mobile pour levé en mode dynamique

Pour valider les angles de visée déterminés par ajustage statique tel que proposé, des nuages de points ont été collectés en mode dynamique dans le périmètre de l'Université Laval tel que montré à la figure (3.1). Parmi tous ces levés (tableau 3.17), l'analyse de performances des angles de visée déterminés par ajustage a été appliquée pour les levés du 24-05-2018 et du 01-11-2017.

TABLEAU 3.17 – Levés effectués en mode dynamique sur le campus de l'Université Laval

Date DD-MM-AAAA	Début HH :MM :SS (UTC)	Fin (UTC) HH :MM :SS (UTC)	Durée HH :MM :SS	Nombre de passages	Site	Plateforme
24-05-2018	07 :10 :00	08 :01 :16	00 :51 :16	17	2+3	Charriot
24-05-2018	08 :43 :17	08 :48 :13	00 :04 :56	2	5	Charriot
15-06-2018	09 :40 :00	10 :01 :18	00 :21 :18	4	3	Charriot
27-07-2017	02 :56 :48	04 :33 :49	01 :37 :01	9	Campus	Véhicule
01-11-2017*	03 :47 :17	04 :46 :17	00 :59 :00	5	Campus	Véhicule
29-08-2018*	02 :50 :30	04 :39 :14	01 :48 :44	8	Campus	Véhicule

* La caméra Ladybug 3 G360° a été utilisée lors de l'acquisition des données pour coloriser les nuages en RGB.

L'annexe E4 présente des photos du montage lors du levé en mode dynamique avec le véhicule.

3.2 Traitement des données lidar mobile

Une fois que les fichiers .las et POS sont récupérés à l'étape 5 du workflow d'opérations, le workflow de traitement des données peut se résumer aux étapes illustrées dans le diagramme à la figure (3.13).

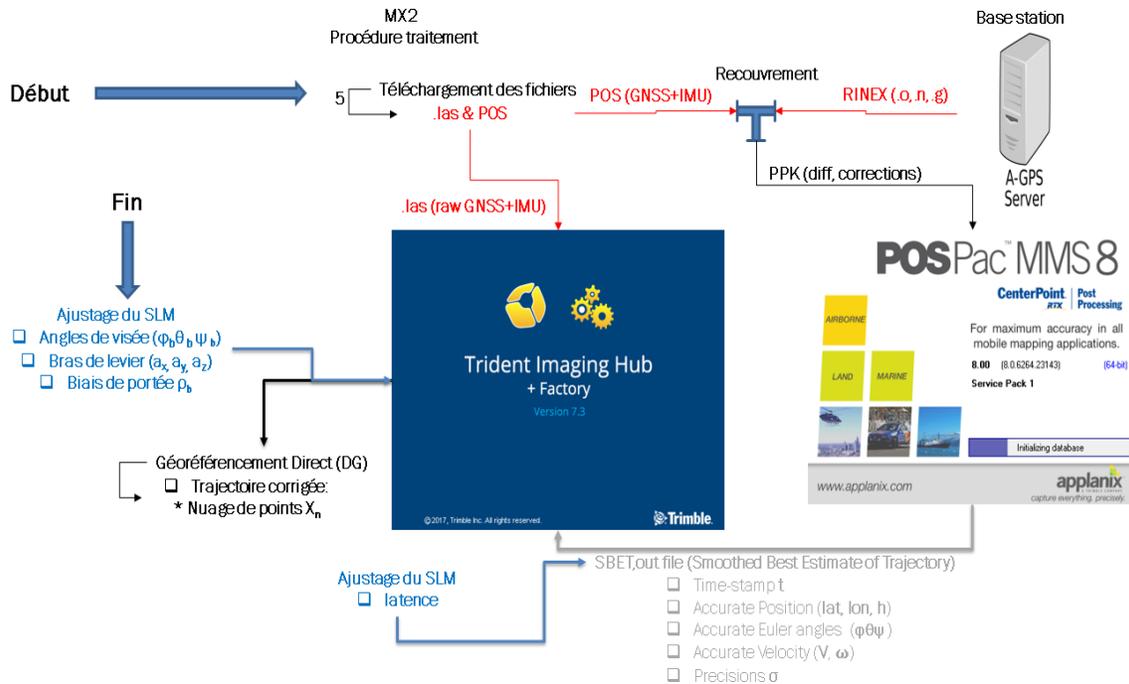


FIGURE 3.13 – Workflow du traitement des données lidar mobile (POSPac-Trident)

Pour ce qui a trait aux données de navigation, celles-ci ont été posttraitées en utilisant la station GPS permanente du MERN située à environ 7 km au nord du campus de l'Université Laval. Cette station de base est connue sous le nom ATRI et ses données journalières sont disponibles sur le site web ftp du MRN (Ministère des Ressources Naturelles). En ce qui concerne le traitement des données lidar mobile avec trident, celui-ci est scindé en deux parties pour atteindre les objectifs discutés :

1. L'estimation des paramètres d'ajustage (angles de visée) ;
2. La validation des résultats

3.2.1 Angles de visée

Traitements destinés à l'ajustage

L'annexe C présente les observations posttraitées de la matrice C_{bl}^n qui ont été utilisées pour l'ajustement des angles de visée. Ces observations posttraitées (angles d'attitude) permettront de réaliser une comparaison avec les solutions obtenues en utilisant les observations brutes. La figure (3.14) permet d'illustrer les différentes étapes menant à l'estimation des angles de visée.

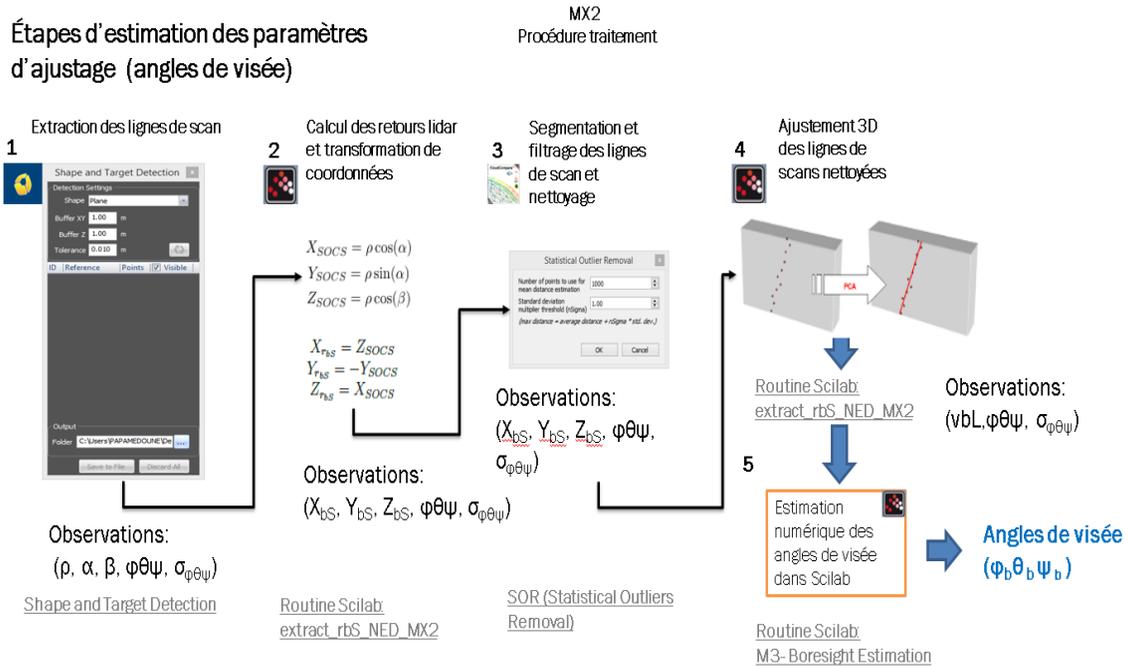


FIGURE 3.14 – Workflow d'estimation des paramètres d'ajustage (angles de visée)

À l'étape 1, pour chaque station de scan, on visualise le nuage de points et à l'aide de l'outil d'extraction du logiciel Trident *Shape and Target Detection* on extrait les points de la ligne de

scan. Le format de fichier d'export est de type (.csv) contenant, entre autres, les informations sur les angles d'attitude et leur incertitude, les mesures d'angle et de distances du scanner. À l'étape 2, les observations du scanner (portée, angle1 et angle2) seront utilisées dans la routine *Extract_rbS_NED_MX2*, développée lors de mon stage, pour calculer les coordonnées de chaque retour dans le système de coordonnées local du scanner (SOCS : Scanner's Own Coordinates System) qui seront par la suite converties dans le système r_{bS} . Les coordonnées dans le repère SOCS se calculeront comme suit :

$$\begin{aligned} X_{SOCS} &= \rho \cos(\alpha) \\ Y_{SOCS} &= \rho \sin(\alpha) \\ Z_{SOCS} &= \rho \cos(\beta) \end{aligned} \tag{3.1}$$

- ρ est la portée brute observée par le scanner
- α est l'angle de dépointage du faisceau laser (angle1 = 0 à 360 °)
- β est l'angle d'oscillation de l'axe de rotation du scanner (angle2 = $\pm 89,8^\circ = 1.56$ rad)

Les angles bruts du scanner contenus dans les fichiers .las (angle V et angle H) sont transformés par Trident, en angles SOCS contenus dans les fichiers .csv exportés (angle1 et angle2). Il ne s'agit pas d'un simple changement de nom, les coordonnées calculées par les deux méthodes donnent des résultats différents comme montrés au tableau (3.18). Un même retour lidar a été calculé en utilisant les données du fichier las et du fichier csv. Les écarts absolus en x et y ne sont pas significatifs alors que pour z (axe de rotation du scanner) on a un écart de 6cm. L'angle d'oscillation est considéré à 90° dans le second cas, ce qui veut dire que le scanner balaye un plan XY parfait. Dans le premier cas, une certaine incertitude est reliée à la ligne de balayage en fonction de la distance de la cible.

TABLEAU 3.18 – Observations du scanner SOCS : .csv vs .las

ANGLE1	ANGLE2	BEAMDIST	x	y	z
4.5676	1.5676	18.53	-2.67	-18.34	0.06
Angle V	Angle H	Distance	x	y	z
4.8576	1.5708	18.53	2.68	-18.33	0.00

Les résultats d'angles de visée obtenus dans les deux cas ci-haut présentés seront discutés dans la partie des expériences réalisées. À l'étape 2, un calcul est fait en considérant l'angle d'oscillation du fichier .csv, dans un cas et l'angle d'oscillation du fichier .las, dans l'autre cas.

La deuxième manipulation à l'étape 2 consiste à transformer les coordonnées du repère SOCS vers le repère r_{bS} . Celui-ci est orienté NED.

La transformation SOCS vers r_{bS} se fait comme suit : Soit la convention ENU (East, North, Up) qui est utilisée pour définir le repère corps (b) de la plateforme du MX2 et dont l'origine correspond au COG (Center of Gravity) de l'IMU :

- L'axe Y est orienté vers l'avant du véhicule
- L'axe X vers la droite du véhicule
- L'axe Z vers le haut du véhicule

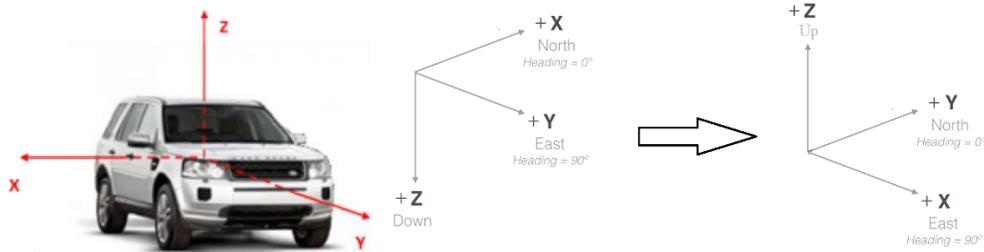


FIGURE 3.15 – À gauche convention ENU extrait de Trimble MX2, (2013). ; à droite NED vs ENU

En considérant le NED et l'ENU comme deux systèmes orthonormés directs, la figure (3.2.1) illustre l'orientation des axes de chaque système qui permet de déduire la transformation de coordonnées suivante :

$$\begin{aligned}
 X_{ENU} &= Y_{NED} \\
 Y_{ENU} &= X_{NED} \\
 Z_{ENU} &= -Z_{NED}
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

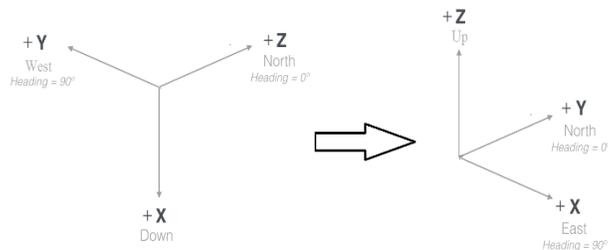


FIGURE 3.16 – SOCS vs ENU

En considérant le SOCS et l'ENU comme deux systèmes orthonormés directs, la figure (3.2.1) illustre l'orientation des axes de chaque système qui permet de déduire la transformation de coordonnées suivante :

$$\begin{aligned}
X_{ENU} &= -Y_{SOCS} \\
Y_{ENU} &= Z_{SOCS} \\
Z_{ENU} &= -X_{SOCS}
\end{aligned}
\tag{3.3}$$

On peut donc aisément déduire que la transformation SOCS vers r_{bS} est la suivante :

$$\begin{aligned}
X_{r_{bS}} &= Z_{SOCS} \\
Y_{r_{bS}} &= -Y_{SOCS} \\
Z_{r_{bS}} &= X_{SOCS}
\end{aligned}
\tag{3.4}$$

À l'étape 3, les lignes de scan sont nettoyées avec Cloud Compare pour éliminer les objets (décrochage, points mixtes) qui ne sont pas sur la ligne de scan. Cette étape est visuelle et nécessaire, car le filtrage à l'étape 1 est passable. Les nuages de points sont par la suite repris dans la routine *Extract_VbL_NED_MX2*, développée lors de mon stage, pour faire l'ajustement 3D des lignes de scans à l'étape 4. Dans ce programme, l'ajustement des points formant une ligne de scan se fait en utilisant une analyse par composantes principales (ACP). Le vecteur directeur estimé de la ligne de scan correspond au vecteur propre associé à la plus grande valeur singulière de la matrice de variance-covariances calculée. Une moyenne des angles d'attitudes et des incertitudes de chaque point est ensuite calculée pour associer une orientation à chaque vecteur directeur. Une description des fichiers d'entrée et de sortie des routines *Extract_rbS_NED_MX2* et *Extract_VbL_NED_MX2* est placée à l'annexe D1. À l'étape 5, le code source *Boresight Estimation* adapté lors de mon stage, est utilisé. Une description du programme est placée à l'annexe D1.

Pour clore cette partie, une illustration du patron de lignes de 36 stations est présentée à la figure (3.17). Ce résultat est obtenu en effectuant les étapes de traitement des données dans POSPac et dans Trident pour géoréférencer les points à partir de la trajectoire optimale.

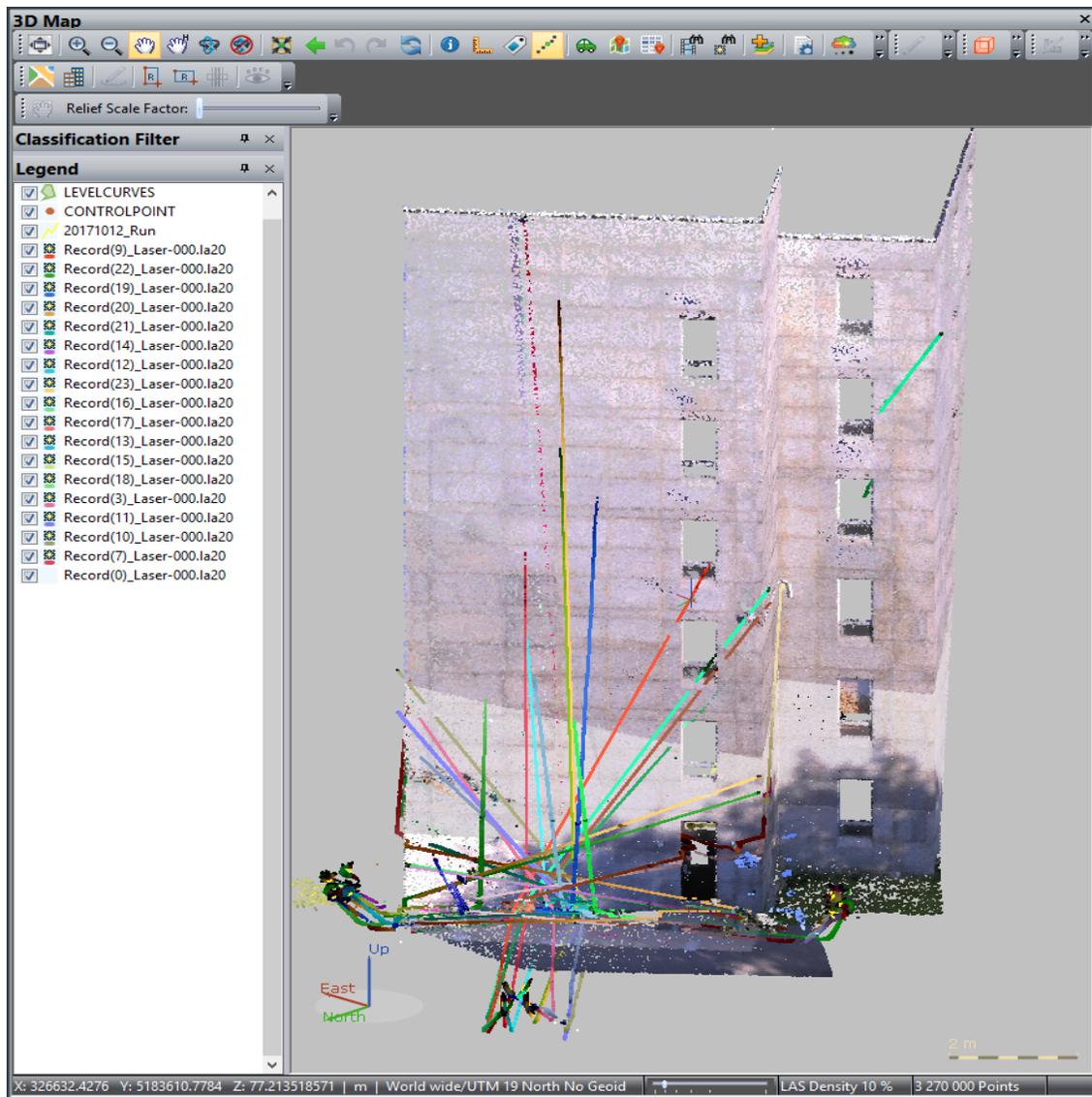


FIGURE 3.17 – Patron de lignes de 36 stations d’ajustage statique dans Trident superposés à un nuage de points RGB de la SX10

Traitements destinés à la validation de la méthodologie

Une série d’expériences a été menée sur le premier jeu de données de 36 stations collecté le 12-10-2017. Ces expériences ont pour but de valider certaines affirmations issues du chapitre 3 et pour mieux comprendre les résultats obtenus. Par conséquent, elles ne sont pas répétées pour toutes les collectes dans le but d’alléger le document. Tout d’abord, les étapes menant à la validation des résultats sont présentées à la figure (3.18).

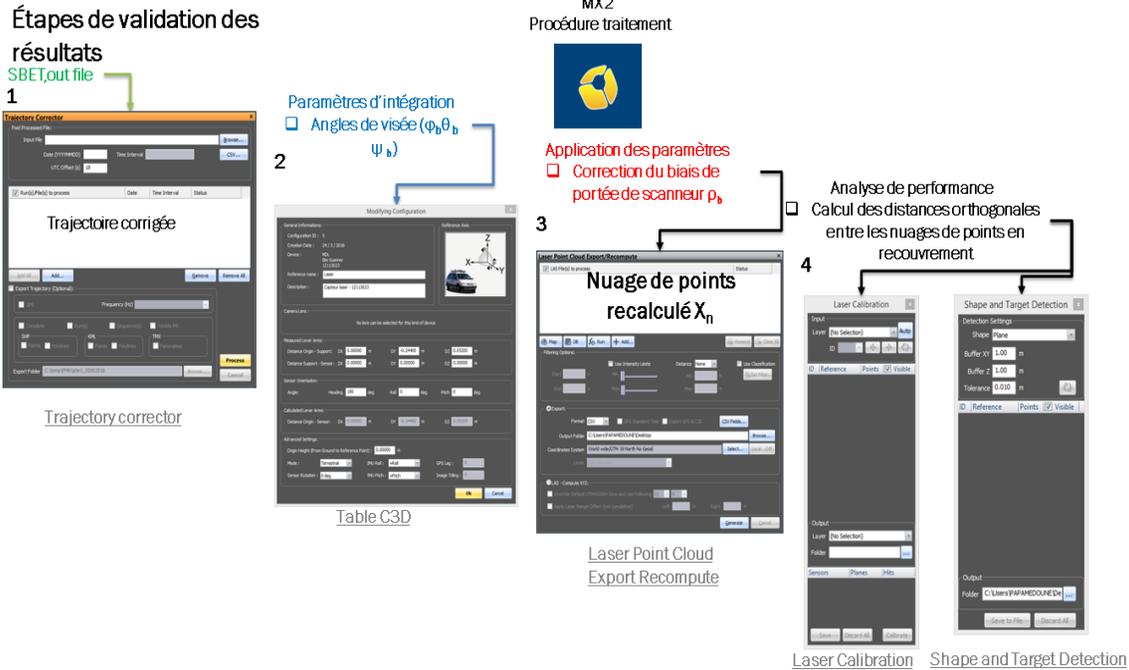


FIGURE 3.18 – Workflow de validation des résultats avec Trident

L'étape 1 n'est pas effectuée dans le cadre de ces expériences. Dans un premier temps, il faut vérifier l'hypothèse selon laquelle, les bras de levier n'ont pas d'impact sur la méthode d'ajustement statique. Pour ce faire, l'étape 2 à la figure (3.18) a permis de vérifier que les bras de levier sont ajoutés lors du géoréférencement et l'étape 4 a permis d'exporter les 36 fichiers .csv contenant les lignes de scan géoréférencées dans le repère de navigation. Ces deux manipulations ne changent pas les données brutes qu'on utilise pour calculer les retours r_{bS} . Le logiciel Trident change uniquement les coordonnées des points X_n . Par conséquent, il est nécessaire de partir des X_n recalculés et du point d'origine P_n connu, soit l'équation 3.5 pour retrouver l'impact des bras de levier sur les retours r_{bS} :

$$r_{bS} := \begin{pmatrix} x_{bS} \\ y_{bS} \\ z_{bS} \end{pmatrix} = [X_n - P_n] \cdot [C_{bI}^n(\varphi, \theta, \psi) \cdot C_{bS}^{bI}(\delta\varphi, \delta\theta, \delta\psi)]^T \quad (3.5)$$

Les coordonnées X_n et P_n sont fournies dans la projection UTM zone 19. Il faut donc appliquer la projection inverse pour revenir aux coordonnées TRF (latitude et longitude ellipsoïdiques) et du système géocentrique cartésien on passe au système LGF. Cette rétroingénierie est développée dans un programme scilab nommé *Mcompute_rbS_UTM_to_LGF*, écrite lors de mon stage. Des routines que j'ai développées lors de mes études au premier cycle ont été utilisées.

En faisant ces calculs, on compare le résultat obtenu r_{bS} (UTM to LGF) par rapport aux coordonnées SOCS calculés avec l'angle de dépointage et la portée dans le repère SOCS qui est transformé en r_{bS} (système NED). On part des affirmations suivantes :

1. SOCS : repère local du scanneur SLM-250
2. ENU : repère cartographique MX2 dans Trident
3. NED : repère local de l'IMU
4. r_{bS} : repère local du scanneur dans le système NED

Lors de l'extraction des lignes de scan dans Trident, les paramètres de montage par défaut du SLM sont en $X_{ENU} = Y_{NED} = 0$, en $Y_{ENU} = X_{NED} = 244mm$ et en $Z_{ENU} = -Z_{NED} = 52mm$ à l'étape 2 du workflow de validation.

L'origine du r_{bS} et du SOCS sont équivalentes, soit le centre optique du scanneur, mais leurs axes sont orientés différemment (Voir annexe A). L'origine du NED quant à lui correspond au COG de l'IMU. On remarque donc :

1. Le bras de levier en Z de 52mm est une constante qui est soustraite à la coordonnée X_{SCOCS} qui devient la coordonnée Z_{bS} . En effet, le scanneur et la centrale inertielle ne sont pas alignés en élévation. L'origine du SOCS est 52mm plus haut que celle du IMU. Lors du calcul des X_n dans Trident, le logiciel enlève 52mm pour revenir à l'origine du NED.
2. Le bras de levier en Y_{ENU} de 244mm est une constante qui s'ajoute à la coordonnée Z_{SCOCS} qui devient la coordonnée X_{bS} . Lors du calcul des X_n dans Trident, le logiciel ajoute 244mm pour revenir à l'origine du NED.

Soit la ligne de scan (calculée par la routine Extract_rbS_NED_MX2) contenant les 5 observations lidar suivantes :

TABLEAU 3.19 – Impact des bras de levier 1a

X	Y	Z	Roulis(deg)	Tangage(deg)	Lacet(deg)
0.024322238	7.484420718	0.829697365	-0.817304	1.488163	112.523979
0.024484593	7.534844431	0.828631731	-0.817304	1.488163	112.523980
0.024580402	7.565388839	0.825310414	-0.817303	1.488162	112.523981
0.024709978	7.605874899	0.823011783	-0.817303	1.488162	112.523982
0.024871441	7.656307047	0.821707086	-0.817302	1.488161	112.523983

L'ajustement de cette ligne donne le résultat suivant :

TABLEAU 3.20 – Impact des bras de levier 1b

v1	v2	v3	Roulis(rad)	Tangage(rad)	Lacet(rad)
-0.003187933	-0.998692301	0.051024758	-0.014264632	0.02597333	1.963913956

Soit la ligne de scan (calculée par la routine `Mcompute_rbS_UTM_to_LGF`) contenant les 5 observations lidar suivantes :

TABLE 3.21 – Impact des bras de levier 2a

X	Y	Z	Roulis(deg)	Tangage(deg)	Lacet(deg)
0.268322238	7.484420718	0.777697365	-0.817304	1.488163	112.523979
0.268484593	7.534844431	0.776631731	-0.817304	1.488163	112.523980
0.268580402	7.565388839	0.773310414	-0.817303	1.488162	112.523981
0.268709978	7.605874899	0.771011783	-0.817303	1.488162	112.523982
0.268871441	7.656307047	0.769707086	-0.817302	1.488161	112.523983

L’ajustement de cette ligne donne le résultat suivant :

TABLEAU 3.22 – Impact des bras de levier 2b

v1	v2	v3	Roulis(rad)	Tangage(rad)	Lacet(rad)
-0.003187933	-0.998692301	0.051024758	-0.014264632	0.02597333	1.963913956

En somme, les bras de levier n’ont pas d’impact sur le calcul des vecteurs directeurs servant à l’ajustage des angles de visée. En utilisant les 36 lignes de scan et en calculant les angles de visée, on arrive au même résultat dans les deux cas à l’étape 5. On peut donc conclure que les bras de levier n’ont pas d’impact sur la méthode d’ajustage statique proposée.

Pour argumenter le second paragraphe de la section 3.7.1, la même routine “`Mcompute_rbS_UTM-to-LGF`” a été utilisée. Les angles de visée déterminés pour le 12-10-2017 (voir chapitre 5 pour les résultats) ont été appliqués à l’étape 2 du workflow de validation. L’étape 3 permet de prendre en compte les nouvelles valeurs d’angle de visée sur les 36 lignes de scan (c’est-à-dire avec connaissance des angles de visée). Partant de celles-ci, les étapes 1 à 5 du workflow d’estimation sont effectuées.

Le résultat obtenu est :

```

Sortie: fichier txt du résultat obtenu à partir des observations
Number of used stations: 36
=====
Roll Estimation in degrees: -0.0054
Pitch Estimation in degrees: 0.0021
Heading Estimation in degrees: 179.9986
STD Roll Estimation in degrees: 0.04
STD Pitch Estimation in degrees: 0.04
STD Heading Estimation in degrees: 0.07
=====
Variance unit factor: 1
Chi2 Test: 1

```

En somme, on note qu'on obtient de légères corrections inférieures à 20 secondes d'arc. Les valeurs finales déterminées sont presque égales aux angles de montage a priori du fabricant. Cela s'explique, car les angles de visée déterminés ont été appliqués sur les observations qui ont servi à l'ajustement. Cela permet de valider que les résultats obtenus sont justes et fiables en utilisant le programme d'ajustement. Les mésalignements ont été minimisés par les valeurs déterminées et cela se reflète sur le résultat.

Pour vérifier l'impact d'un angle d'oscillation de 90°, la même série d'observations du 12 octobre est utilisée. Les étapes 1 à 5 du workflow d'estimation sont effectuées. Le résultat obtenu avec un angle d'oscillation de 90° est :

```

Sortie: fichier txt du résultat obtenu à partir des observations
Number of used stations: 36
=====
Roll Estimation in degrees: -0.344
Pitch Estimation in degrees: 0.011
Heading Estimation in degrees: 180.061
=====
Variance unit factor: 1
Chi2 Test: 1

```

Le résultat obtenu avec un angle d'oscillation de 89,56° est :

```

Sortie: fichier txt du résultat obtenu à partir des observations
Number of used stations: 36
=====
Roll Estimation in degrees: -0.344
Pitch Estimation in degrees: 0.057
Heading Estimation in degrees: 180.062
=====
Variance unit factor: 1
Chi2 Test: 1

```

On remarque que les écarts en roulis et lacet sont nuls alors que pour le tangage, l'écart est de l'ordre de 3 minutes. Il existe une corrélation entre la coordonnée z (oscillation de l'axe Z_{SOCS} du scanneur) et l'angle de visée en tangage. On peut déduire qu'une grande contribution de l'angle de visée du tangage (0.05°) provient du scanneur qui n'est pas nivelé à l'horizontale. Cela s'explique par le fait que l'axe de rotation du scanneur Z et l'axe de tangage du SLM sont dans le même plan.

Considérant que parmi les sources d'erreurs du scanneur, le biais de portée est un paramètre important, une expérience a été menée pour comparer différentes solutions d'angles de visée affectées par un biais de portée en utilisant la même série d'observations du 12 octobre. Les étapes 1 à 4 du workflow d'estimation sont effectuées. Lors de l'étape 2, les tests suivants ont été faits :

1. $\rho = \rho + 5\text{cm}$
2. $\rho = \rho - 5\text{cm}$
3. $\rho = \rho + 10\text{cm}$
4. $\rho = \rho - 10\text{cm}$

Les résultats obtenus sont compilés dans le tableau (3.23) :

TABLEAU 3.23 – Comparaison de l'impact du biais de portée sur l'ajustage des angles de visée

	$\rho = \rho + 0\text{cm}$	$\rho = \rho + 5\text{cm}$	$\rho = \rho + 10\text{cm}$	$\rho = \rho - 5\text{cm}$	$\rho = \rho - 10\text{cm}$
	Valeurs initiales	Écarts	Écarts	Écarts	Écarts
Roulis ($^\circ$)	-0.344	-0.003	-0.007	0.003	0.007
Tangage ($^\circ$)	0.057	0.013	0.026	-0.013	-0.027
Lacet ($^\circ$)	180.062	-0.002	-0.005	0.002	0.004

On peut conclure que lorsque la portée est plus longue, le roulis et le tangage du scanneur sont plus petits. Le lacet du scanneur est plus grand. Lorsque la valeur de correction est doublée,

on constate la même tendance avec un facteur double pour chaque angle de visée. Dans le cas contraire, lorsque la portée est plus courte, les valeurs de roulis et de tangage sont plus élevées. En général, le tangage est toujours plus affecté par la portée observée. La valeur du lacet diminue.

À l'étape 4 du workflow d'estimation des angles de visée, une comparaison entre les algorithmes PCA (Principal Component Analysis) et SVD (Singular Value Decomposition) a été effectuée. Le résultat obtenu par la méthode PCA est identique à celle obtenue par la méthode SVD. Toutefois, lorsque le nombre de points dépasse 6000 par ligne de scan, l'analyse SVD devient impossible avec Scilab (le stacksize déborde) alors que l'analyse PCA reste flexible et légère.

3.2.2 Latence

Pour la latence POS-lidar, les données POS et las du levé du 24-05-2018 ont été traitées en suivant les étapes du workflow de traitement déjà présenté.

Les nuages de points pour les passages 1 et 2 sont présentés aux figures (3.19 et 3.20). Comme on peut le voir les nuages sont alignés dans le même système de coordonnées. De plus, les paramètres d'intégration du fabricant sont utilisés pour les angles de visée et les bras de levier. Les deux nuages sont affichés et l'on distingue une séparation de plusieurs lignes de scan qui couvrent assez les plans S2 et S3. Pour chaque nuage, ces lignes sont distancées de 26 cm en moyenne.

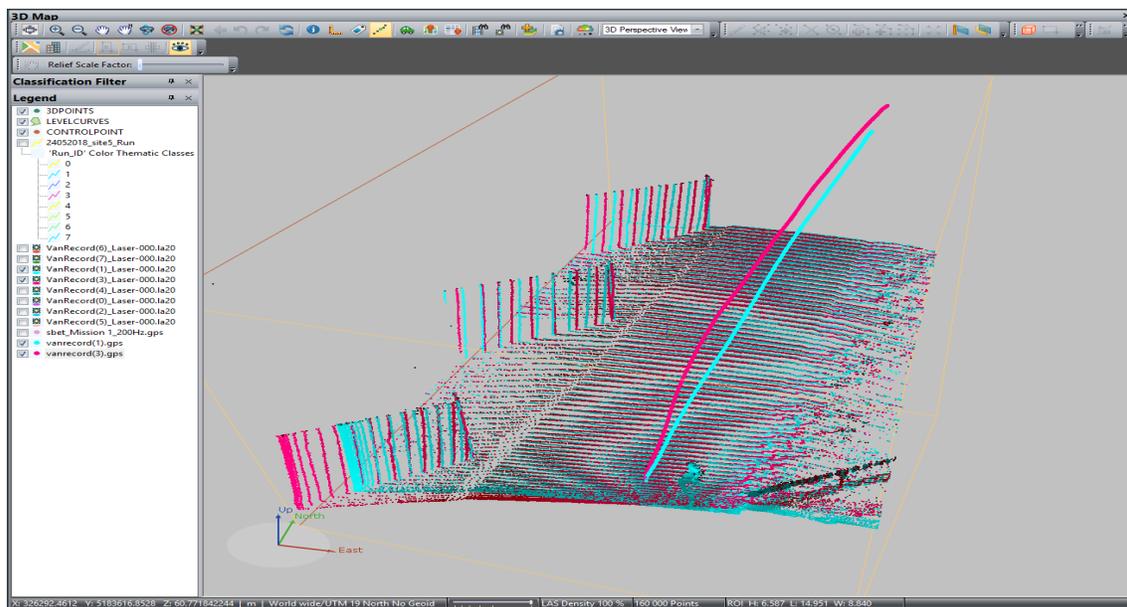


FIGURE 3.19 – Vue en perspective des nuages de points au site 4, passage 1 et 2 dans le logiciel Trident.

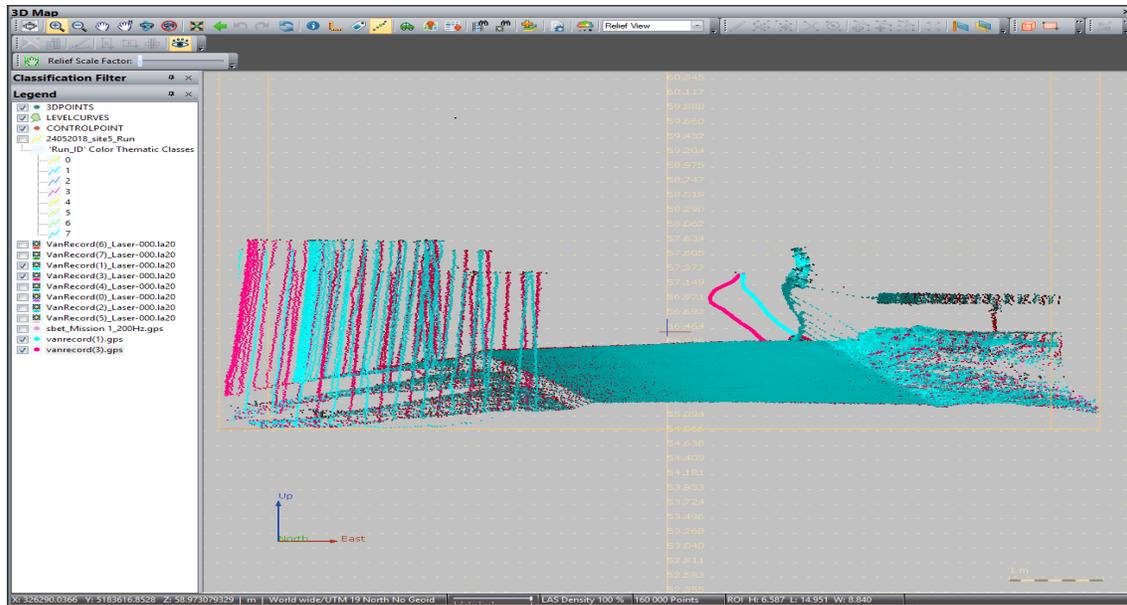


FIGURE 3.20 – Vue en relief des nuages de points au site 4, passage 1 et 2 dans le logiciel Trident.

La seconde étape consiste à utiliser l’outil “Shape and Target detection” du logiciel Trident (figure 3.21) pour mesurer les distances orthogonales entre les deux nuages qui se recouvrent pour chaque plan. Une tolérance de 1 cm pour l’épaisseur du plan est appliquée en tenant compte de l’incertitude de mesure du scanneur qui est de 1 cm (Trimble, 2013).

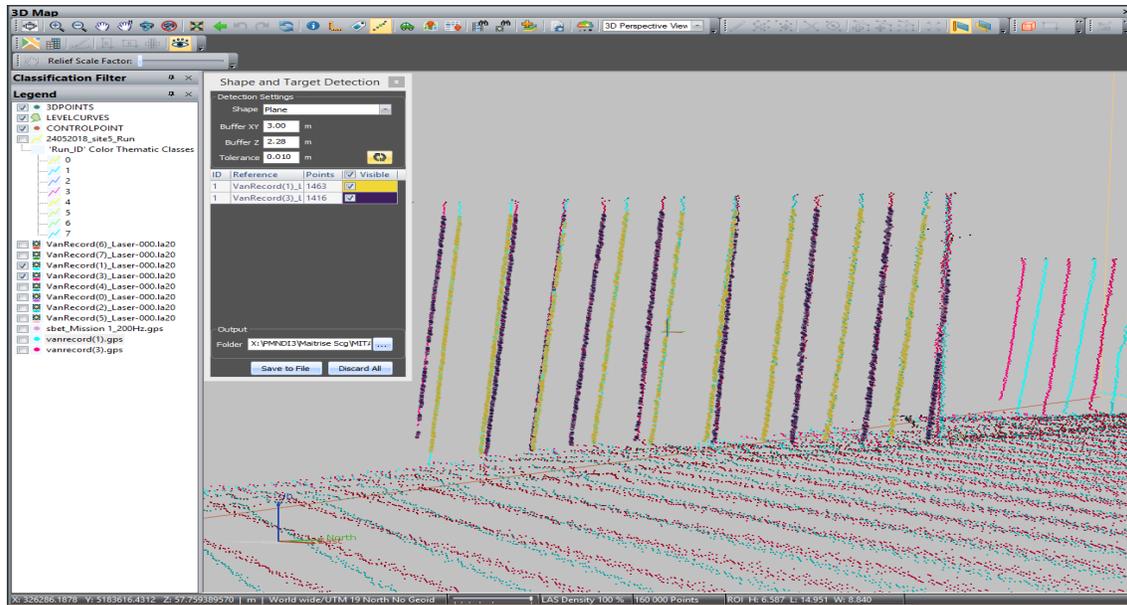


FIGURE 3.21 – Calcul de la distance de décalage du nuage de points du passage 1 par rapport à celui du passage 2 (Plan S2) dans le logiciel Trident.

On compte en moyenne 8 à 9 lignes de scan pour chaque plan. La démarche appliquée est de cliquer sur chaque ligne pour calculer la distance moyenne entre les deux nuages. Cette distance sera par la suite moyennée pour obtenir une estimation pondérée du décalage causé par la différence de vitesse de déplacement du SLM. Les tableaux (3.24 et 3.25) fournissent les informations qui ont été fournies par Trident pour chaque plan.

TABLEAU 3.24 – Distance de décalage DX calculée entre les deux passages au plan S2

Distance ortho (cm)	Distance du plan Passage1 (m)	Distance du plan Passage2 (m)	Intervalle de temps GPS (Secondes du jour) Passage1	Intervalle de temps GPS (Secondes du jour) Passage2
0.6	5.0	4.4	73641.5	73685.9
1.1	4.7	4.3	73641.5	73686.0
1.0	4.4	4.0	73641.6	73686.0
1.3	4.1	3.7	73641.7	73686.1
1.1	3.9	3.3	73641.7	73686.1
1.3	3.6	3.2	73641.8	73686.2
1.2	3.3	2.7	73641.9	73686.3
1.4	3.2	2.7	73641.9	73686.3

TABLEAU 3.25 – Distance de décalage DX calculée entre les deux passages au plan S3

Distance ortho (cm)	Distance du plan Passage1 (m)	Distance du plan Passage2 (m)	Intervalle de temps GPS (Secondes du jour) Passage1	Intervalle de temps GPS (Secondes du jour) Passage2
1.1	4.9	4.7	73643.1	73687.5
0.5	4.7	4.2	73643.1	73687.6
0.4	4.2	3.8	73643.2	73687.7
1.3	4.0	3.7	73643.3	73687.7
1.5	3.7	3.4	73643.3	73687.8
1.6	3.4	3.1	73643.4	73687.8
1.4	3.1	2.7	73643.5	73687.9

En considérant que la date du 24-05-2018 à minuit correspond au temps GPS 345600, on peut obtenir la vitesse propre du SLM parcourue dans ces intervalles de temps à l'aide de POSPac. Les vitesses peuvent être extraites des données filtrées par le logiciel POSPac, sous forme de tableau, pour un calcul précis de la latence. Les représentations graphiques de celles-ci sont placées à l'annexe D2. Les variables nécessaires pour calculer la latence sont présentées au tableau (3.26).

TABLEAU 3.26 – DX moyen et vitesse moyenne pour les plans S2 et S3

Plan	Passage	Distance ortho moy. (cm)	Interval de temps (s)	Vitesse moy. (m/s) POSPac	V2-V1 (m/s)
S2	1	1.125	0.395	0.58405383	0.2163329
	2		0.395	0.80038712	
S3	1	1.114	0.395	0.72120029	0.2865306
	2		0.395	0.43466720	

Pour la latence IMU-lidar, avec le levé du 29-05-2018 les vitesses angulaires de rotation en roulis sont trop grandes, ce qui crée un mauvais géoréférencement des points lidar tel que montré à la figure (3.22). En effet, la vitesse angulaire de roulis est de l'ordre de $90^\circ/s$ ou plus lors des sessions d'enregistrement (annexe D2). Par conséquent, l'IMU est surchargé par rapport à son taux d'échantillonnage de base. En pratique, lors des levés en mode dynamique qui ont été effectués sur le campus de l'Université Laval à l'aide du véhicule, les vitesses angulaires sont d'un ordre de grandeur de $10^\circ/s$. La vitesse angulaire de rotation pour le test de latence IMU-lidar devrait donc être conditionnée autour de cette valeur. Lors du levé du 15-06-2018, les vitesses angulaires sont très faibles par rapport à la valeur anticipée pour les

zones d'extraction temporelle de Δ_n ciblés (environ $0.2^\circ/\text{s}$). L'estimation de Δ_n s'est fait de la même manière que proposée pour la latence POS-lidar en utilisant Trident. Les résultats obtenus sont du même ordre de grandeur que la latence POS-lidar. La description de la routine utilisée (`calc_lat_IMU_lidar`), écrite lors de mon stage, est placée à l'annexe D2. En réalité, le montage proposé est trop manuel pour générer une vitesse angulaire exacte. En somme, à cause des limitations liées à l'acquisition, les données collectées n'ont pas pu être traitées efficacement dans cette partie pour extraire la latence IMU-lidar. Ce montage mécanique doit être mieux contrôlé tel que proposé dans le cas de la table tournante.

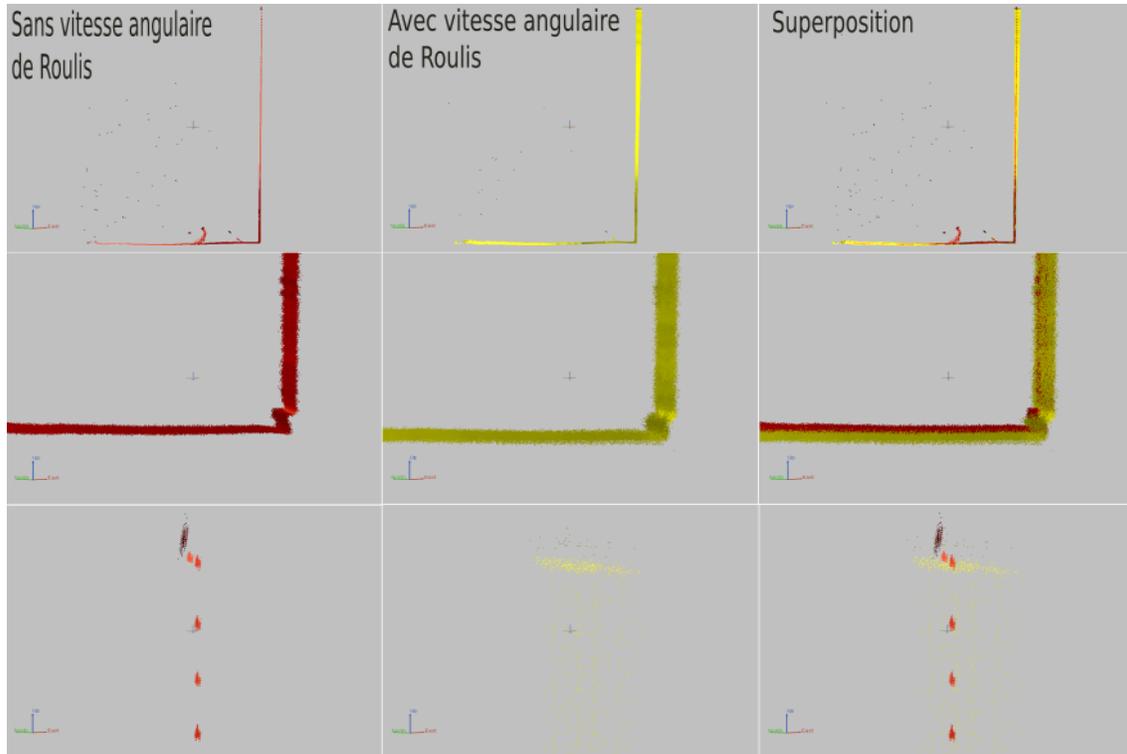


FIGURE 3.22 – Fausse détection de latence IMU-lidar au Site 1

3.2.3 Biais de portée

Suivant les étapes du workflow de traitement déjà présentées, les deux séries d'observations ont été traitées pour l'analyse du biais de portée du scanneur. Les nuages de points sont présentés aux figures (3.23 et 3.24). La routine "`Mcompute_cloud_distance.sce`", développée lors de mon stage, dont la description est placée à l'annexe D1 a été utilisée pour calculer les distances relatives entre les deux murs. Ces distances seront comparées à celles calculées dans un nuage de points de référence. Les deux nuages sont dans le système SCOPQ zone 7 avec des élévations orthométriques HT2.

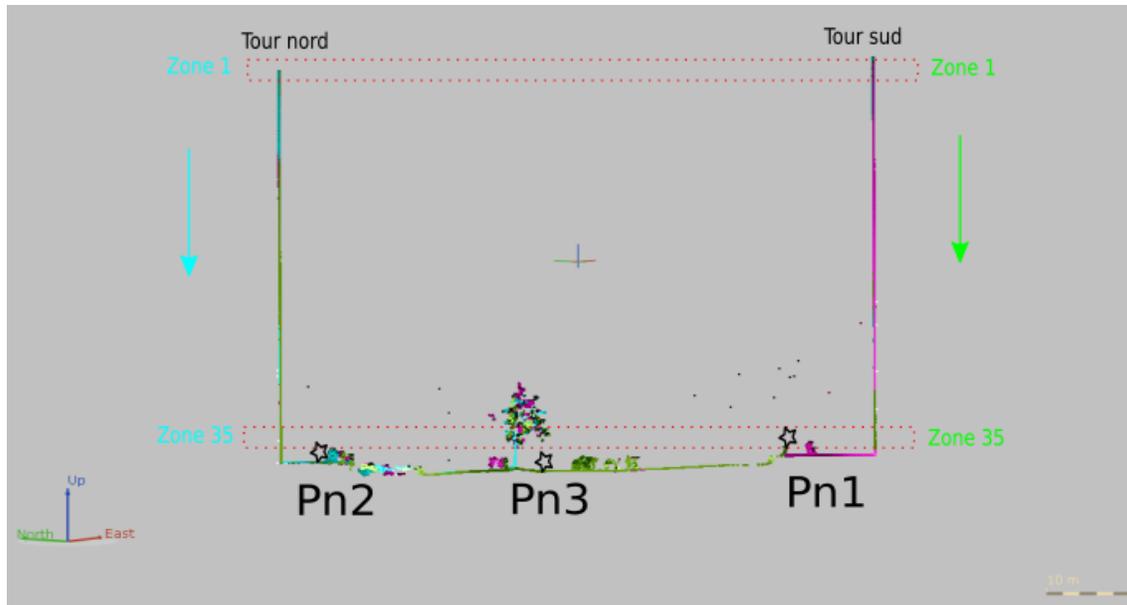


FIGURE 3.23 – Zone d’extraction des données lidar pour la série 1

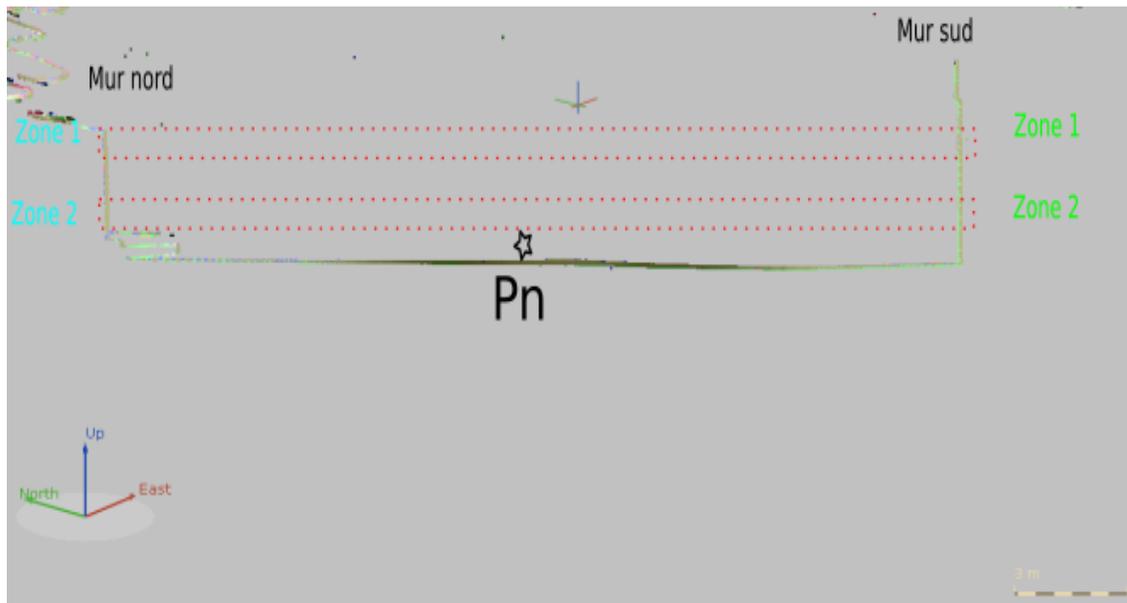


FIGURE 3.24 – Zone d’extraction des données lidar pour la série 2

Pour chaque zone d’extraction, le centroïde du nuage de points est calculé en moyennant les coordonnées XYZ. Par la suite, les vecteurs DN, DE et DH sont calculés entre chaque paire de centroïdes pour obtenir la distance 3D dans le repère de projection. La distance dans la projection est calculée avec la formule suivante :

$$Dp = \sqrt{DN^2 + DE^2} \quad (3.6)$$

La distance 3D est calculée selon l'équation

$$D = \sqrt{DN^2 + DE^2 + DH^2} \quad (3.7)$$

Au site 3, étant donné que les 35 centroïdes, pour chaque mur, ne sont pas alignés en planimétrie, une régression linéaire (Douglas Peucker, Prasad et al. (2011)) a été effectuée pour calculer l'écart maximal transversal (Et) de chaque centroïde par rapport à la ligne. En effet, en calculant cet écart, on peut quantifier l'impact ξ de chaque centroïde sur la distance moyenne (Dm) avec la formule 3.8. Par exemple, pour une distance moyenne de 70 mètres, et un écart transversal de 50 cm, l'impact ξ est de 2mm.

$$\xi = \sqrt{Dm^2 + Et^2} - Dm \quad (3.8)$$

Les graphiques 3.25, 3.26 et 3.27 présentent les distances calculées entre les 35 pairs de centroïdes au site 3.

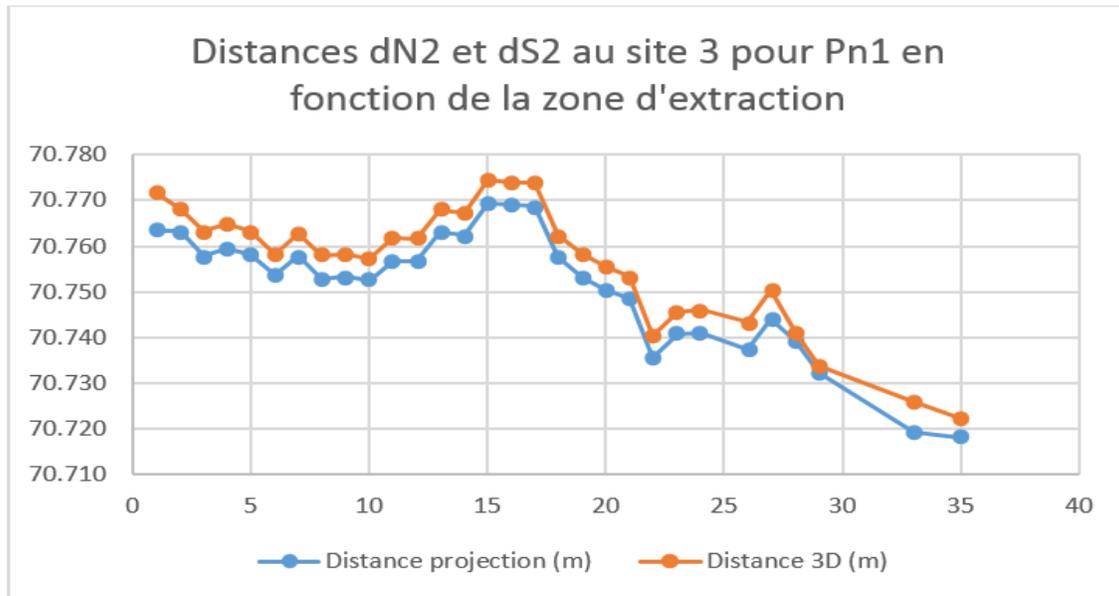


FIGURE 3.25 – Distances, au Pn1, entre les murs nord et sud obtenues avec le Trimble MX2

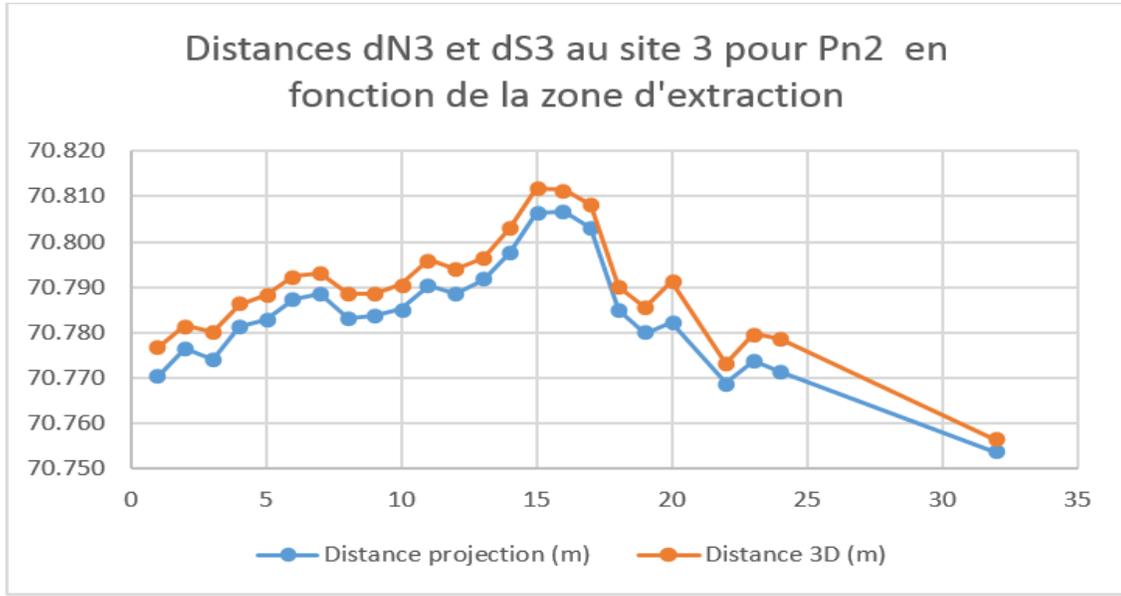


FIGURE 3.26 – Distances, au Pn2, entre les murs nord et sud obtenues avec le Trimble MX2

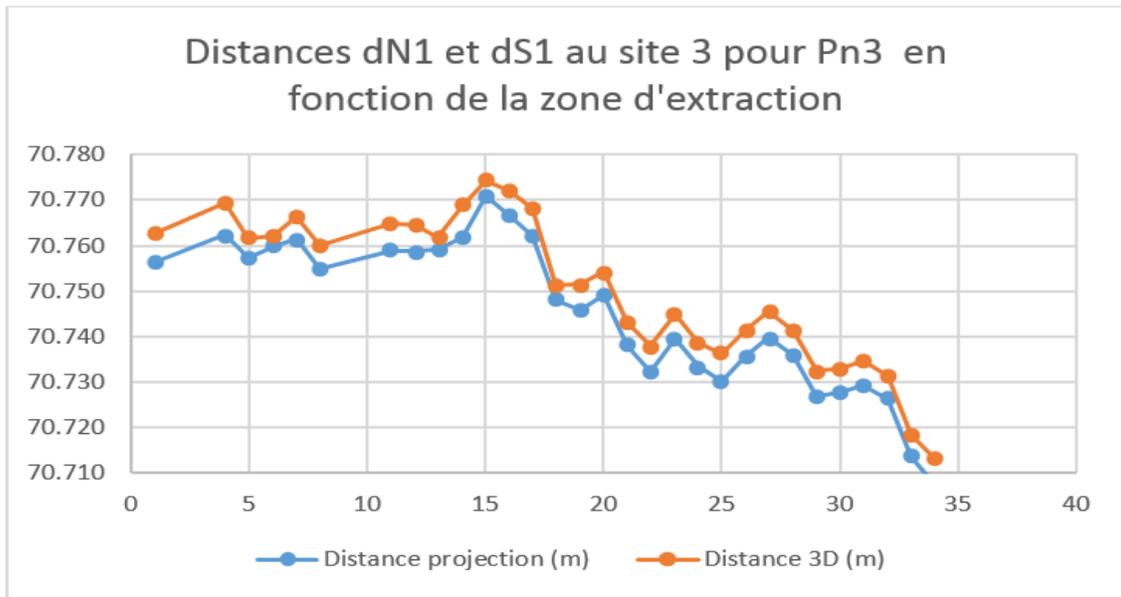


FIGURE 3.27 – Distances, au Pn3, entre les murs nord et sud obtenues avec le Trimble MX2

Comme on peut le constater au tableau (3.27), l'ordre de grandeur des écarts n'aura pas d'influence significative au niveau des distances calculées entre les deux tours. Pour le site 5, on a seulement deux paires de centroïdes. On ne peut pas calculer une ligne moyenne.

TABLEAU 3.27 – Écart transversal maximum pour Pn1, Pn2 et Pn3

Pn	Tour	Écart transversal maximum (Et)
1	sud	0.01
	nord	0.02
2	sud	0.27
	nord	0.13
3	sud	0.01
	nord	0.02

Le tableau (3.28) présente les distances calculées entre les 2 paires de centroïdes au site 5.

TABLEAU 3.28 – Distances dN et dS au site 5 : portée brute

Nuage de points	Zone	Distance projection (m)	Distance 3D (m)
Vanrecord0	1	22.775	22.778
	2	22.752	22.756
Vanrecord1	1	22.777	22.779
	2	22.753	22.757
Vanrecord2	1	22.778	22.781
	2	22.755	22.759
Vanrecord3	1	22.780	22.783
	2	22.757	22.761

Pour cette série du site 5, le biais de portée déterminé par (Landry, 2017) a été appliqué aux quatre nuages de points dans Trident avec l’outil Laser Point Cloud Export Recompute. Une correction positive de 0.052m est saisie au niveau des deux cases (laser left et right). Le tableau (3.29) présente les distances calculées entre les 2 paires de centroïdes au site 5 en appliquant la valeur du biais de portée déterminée pour corriger cette erreur systématique.

Pour évaluer la performance du SLM, les données collectées pour l’analyse du biais de portée doivent être comparées avec des données de référence fiables et exactes. Pour cela, un scanneur 3D est utilisé pour collecter ces données de référence dont on a besoin. Une présentation du scanneur 3D Trimble SX10 et des données de référence collectées est effectuée à la section 4.3. L’annexe D4 présente les observations de navigation posttraitées pour le levé du 16-05-2018 et le levé du 20-08-2018.

TABLEAU 3.29 – Distances entre les deux murs au site 5 : portée corrigée (Landry2017)

Nuage de points	Zone	Distance projection (m)	Distance 3D (m)
Vanrecord0	1	22.876	22.882
	2	22.856	22.860
Vanrecord1	1	22.877	22.883
	2	22.857	22.861
Vanrecord2	1	22.879	22.885
	2	22.858	22.862
Vanrecord3	1	22.880	22.887
	2	22.856	-

3.2.4 Levé en mode dynamique

Les performances du POS pour les levés en mode dynamique du 01 novembre 2017 et du 24 mai 2018 sont présentées à l'annexe D5. Après correction de la trajectoire et recalcul du nuage de points, les mésalignements en roulis, tangage et lacet peuvent être décelés à certains endroits. L'erreur de roulis (figure 3.28) se manifeste par une rotation de la façade autour de l'axe de déplacement. Le mésalignement en tangage (figure 3.29) crée un problème de superposition et de décalage vertical. Enfin, l'erreur de lacet (figure 3.30) se distingue bien sur les objets circulaires comme les lampadaires en ayant des passages en sens contraire écartés.

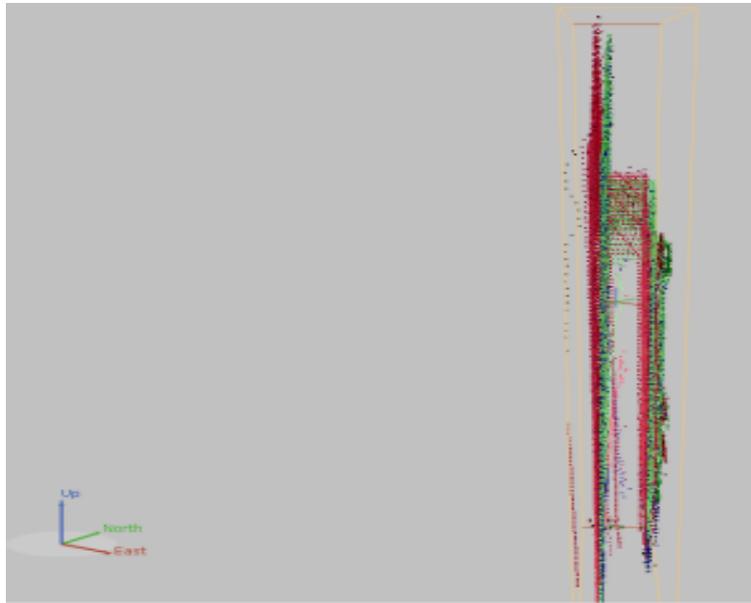


FIGURE 3.28 – Mésalignement en roulis, deux nuages de points du pavillon Casault représentés par deux couleurs différentes y sont montrés.

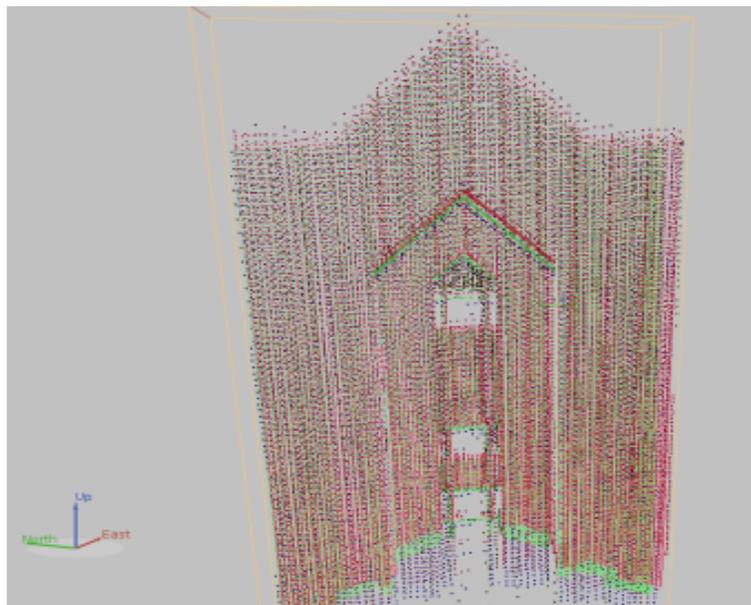


FIGURE 3.29 – Mésalignement en tangage, deux nuages de points du pavillon Casault représentés par deux couleurs différentes y sont montrés.

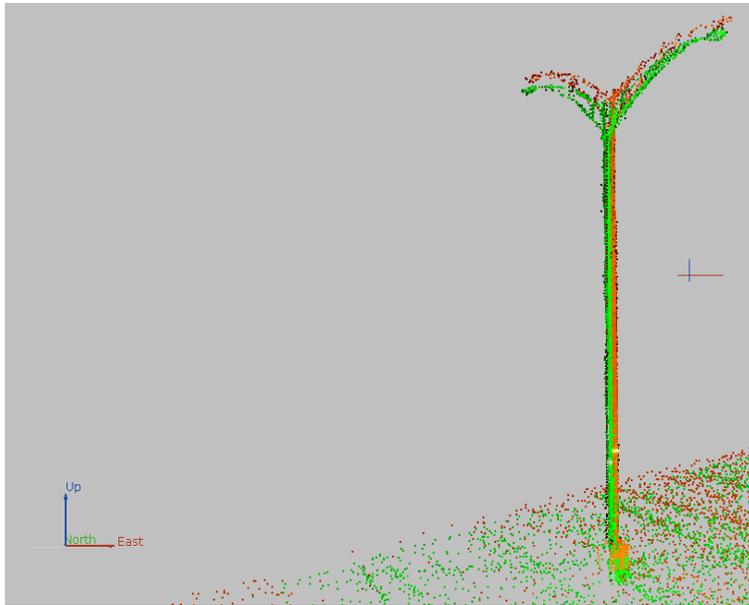


FIGURE 3.30 – Mésalignement en lacet, deux nuages de points d'un lampadaire représentés par deux couleurs différentes y sont montrés.

3.3 Flux d'opérations et données lidar utilisées à titre de vérité terrain

Les 7 et 8 juillet 2018, la multistation Trimble SX10 a été utilisée pour collecter des données lidar sur les sites 1, 2, 3 et 5 du campus. Ces données recueillies ont permis d'évaluer en général les performances du Trimble MX2. Ce système a été prêté par la compagnie Cansel. Une brève présentation des spécifications techniques du système est effectuée dans un premier temps. Par la suite, le mode d'acquisition et les données recueillies sont présentés. Pour terminer, le workflow de traitement des données est abordé.

3.3.1 Station totale avec scanneur lidar : Trimble SX10

La SX10 est un lidar terrestre statique couplé à une station totale permettant de réaliser à la fois des mesures topographiques, de l'imagerie et de la numérisation 3D (Europe, 2017). Le scanneur utilise la technique du temps de trajet. La taille du faisceau laser annoncée par le fabricant est de 8mm à 50m et de 14mm à 100m. Ce qui représente la plus petite empreinte de faisceau sur le marché. Cela permet d'obtenir une haute résolution de scan. Une comparaison visuelle des nuages de points du MX2 et de la SX10 est présentée à la figure (3.31). Comme le MX2, la SX10 permet de consolider directement les nuages de points issus de différentes prises de vue par géoréférencement à partir de points géodésiques. Cela permet de sauver du temps de traitement d'environ 1 heure par station (Goulette, 2009).



FIGURE 3.31 – Comparaison des nuages de points de la SX10 et du MX2, Casault

Le tableau (3.30) résume les spécifications techniques de la SX10. Comme on peut le constater,

cet instrument est très performant pour l’arpentage de précision et peut donc être utilisé comme outil de validation et d’analyse de performances à titre de vérité terrain.

TABLEAU 3.30 – Spécifications techniques de la SX10 (Station, 2016)

Performances station totale robotisée		Performances scanneur lidar	
Angle	1”	Angle	5”
Distance (prisme)	1mm+1.5ppm	Position 3D @100m	2.5mm
Compensateur	0.5”	Divergence @ 50m	8mm
Portée (prisme)	5500m	Portée (laser)	600m

3.3.2 Acquisition des données lidar terrestre

Pour collecter les données sur le campus, des points géodésiques ont été utilisés pour rattacher chaque session de scan au système de coordonnées planes SCOPQ MTM7. Les élévations ont été mesurées par rapport au CGVD28. Le tableau (3.31) présente les coordonnées des points utilisés. La figure (3.32) présente un croquis du levé.

TABLEAU 3.31 – Points d’appui pour le géoréférencement direct des observations lidar (campus de l’U.Laval)

Matricule	Nord (m)	Est (m)	Élévation (m)
UL1403	5183077.300	245652.794	80.604
FP a-g.	5182838.784	245834.719	84.528
30CSL	-	-	87.402
UL1101	5182727.914	245964.046	86.170
UL1605	5182711.455	245937.178	85.830
UL1604	5182779.687	245882.436	85.355
UL1607	5182696.030	245949.497	85.989
UL1501	5182929.804	245564.630	85.017
UL1504	5182641.378	245776.981	87.185
UL1505	5182684.112	245752.931	86.848
UL1506	5182727.966	245692.616	86.790
UL1603	5182799.424	245843.718	85.085

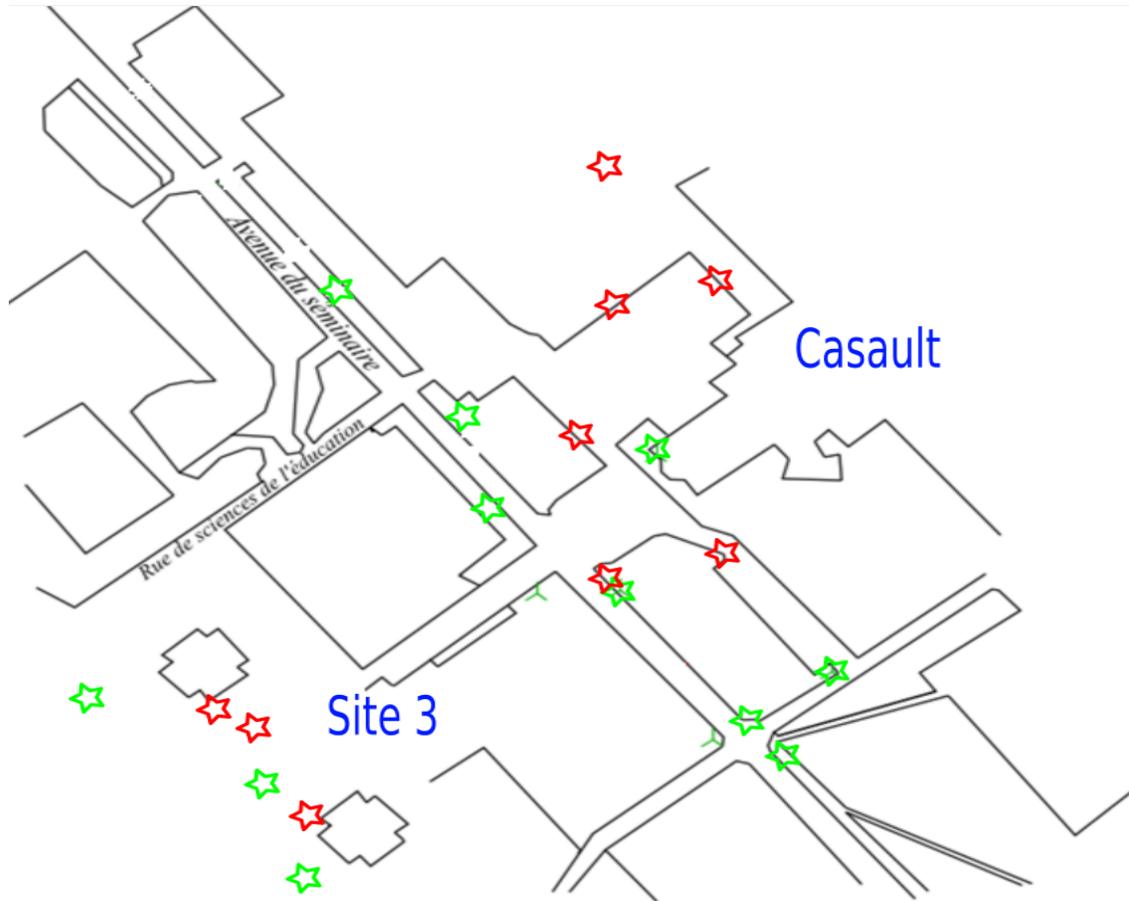


FIGURE 3.32 – Levé topographique et scan 3D. En rouge les stations occupées par la SX10 et en vert les points géodésiques rattachés (Crédit Cassol, 2017)

L'annexe E5 présente des photos du levé en mode statique. Le tableau (3.32) présente une série d'informations relatives à chaque session de scan. Le scan 16 a été effectué au site 5 en face des deux murs pour pouvoir comparer le biais de portée à un second endroit plus découvert pour le signal GNSS. Le scan 15 a permis de numériser le plan d'ajustage statique. L'avantage est de permettre de déterminer la normale au plan qui est un paramètre estimé lors de l'ajustage des angles de visée. Une comparaison sera faite avec le résultat de l'ajustage statique. Les scans 3-4, 5-6 et 7-8, représentent les mesures sur les parois des tours nord et sud, respectivement aux positions Pn3, Pn1 et Pn2. Les scans 1, 11, 12, 13, 14 et 15 représentent le site 2 (façade principale du Casault et façade nord du Casault). Le scan 2 est un nuage de points de la tour sud.

TABLEAU 3.32 – Données télémétriques du levé effectué les 7 et 8 juillet 2018 (SX10)

Site couvert	Nom du nuage de points	Distance couverte (m)	Durée (min)	Nombre de points
2	Scan 1	0	9.0	2 885 333
3	Scan 2	-	2.0	807 855
3	Scan 3	100	5.0	2 627 820
3	Scan 4	-	8.0	3 237 800
3	Scan 5	25	10.0	4 413 806
3	Scan 6	-	9.0	1 282 083
3	Scan 7	30	9.0	1 616 264
3	Scan 8	-	3.0	90 961
3	Scan 9	50	7.0	3 013 419
2	Scan 10	62	7.0	400 000
2	Scan 11	69	12.0	3 067 121
2	Scan 12	31	12.0	2 559 677
2	Scan 13	35	12.0	2 132 480
2	Scan 14	340	12.0	12 058 116
1	Scan 15	149	6.0	2 284 568
5	Scan 16	38	8.0	1 453 829
-	Total	929	52.0	43 931 132

3.3.3 Traitement des données lidar terrestre

Comme déjà mentionné, les données lidar sont géoréférencées directement sur le terrain. Les étapes de traitement supplémentaires ont consisté à effectuer les conversions au format .las et à la colorisation du nuage de points. Les stations ont été contraintes directement sur les coordonnées des points géodésiques. L'incertitude du positionnement est en moyenne de 3cm en planimétrie (provenance des coordonnées) et de 1cm en altimétrie (validation à partir du repère de nivellement 30CSL). Le tableau (3.33) présente un résumé du travail fourni avec la SX10.

TABLEAU 3.33 – Carnet de notes et données télémétriques SX10

Nombre de stations	10
Temps d'acquisition	8 h
Temps de scan	1 h
Résolution @ 50m	6.25mm - 50mm
Champ de vision	360° x 300°
Fréquence de pulsation	26600 Hz
RGB	Oui
Traitement 1	0,5 h (extraction job)
Traitement 2	1 h verification du canvas
Traitement 3	Extraction des .las (0.5h)
Total	11 h
Stockage	1.2 Go

Pour comparer les distances recueillies au site 3 et au site 5 entre les murs, les 7 nuages de points collectés avec le scanner 3D ont servi de vérité terrain. Les figures (3.33 et 3.34) montrent les zones d'extraction pour les deux séries.

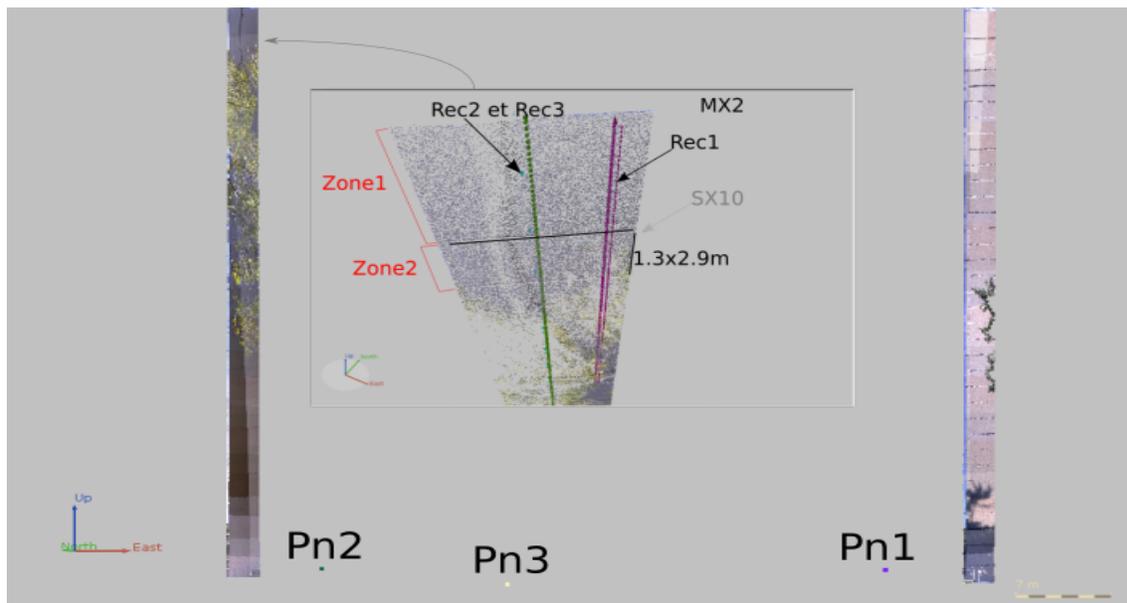


FIGURE 3.33 – Zone d'extraction des données lidar pour la série 1



FIGURE 3.34 – Zone d'extraction des données lidar pour la série 2

Les graphiques (3.35, 3.36 et 3.37) présentent les distances calculées entre les 35 paires de centroïdes au site 3.

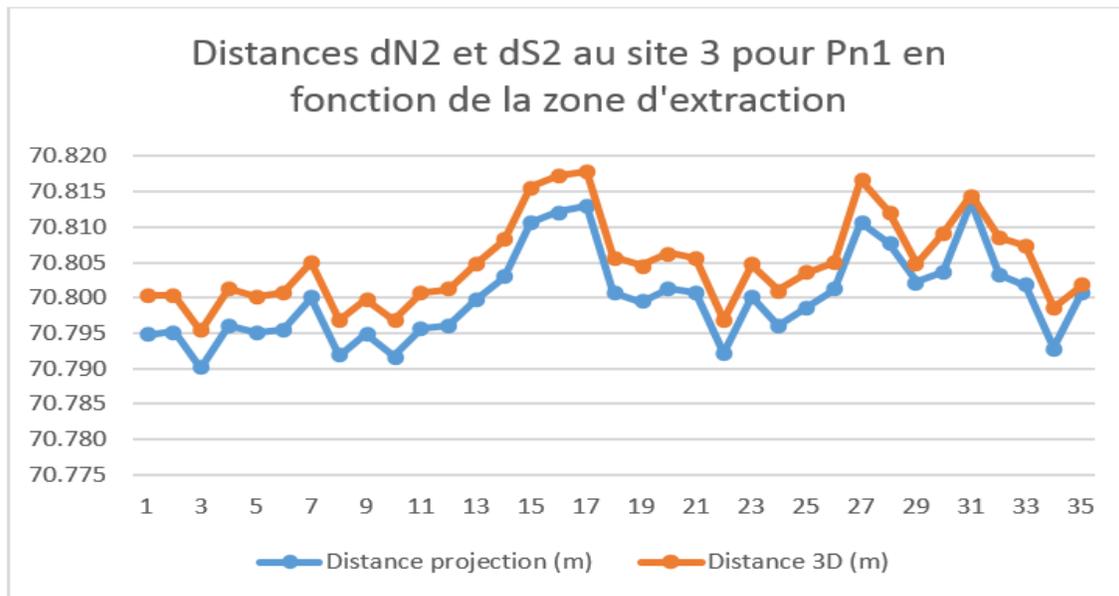


FIGURE 3.35 – Distances, au Pn1, entre les murs nord et sud obtenues avec la SX10

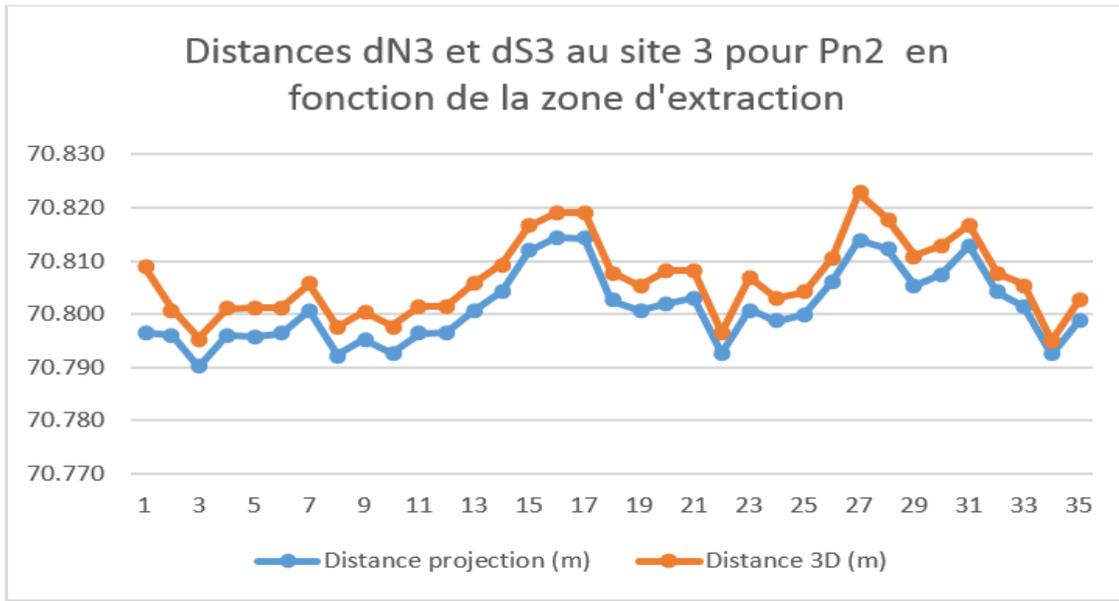


FIGURE 3.36 – Distances, au Pn2, entre les murs nord et sud obtenues avec la SX10

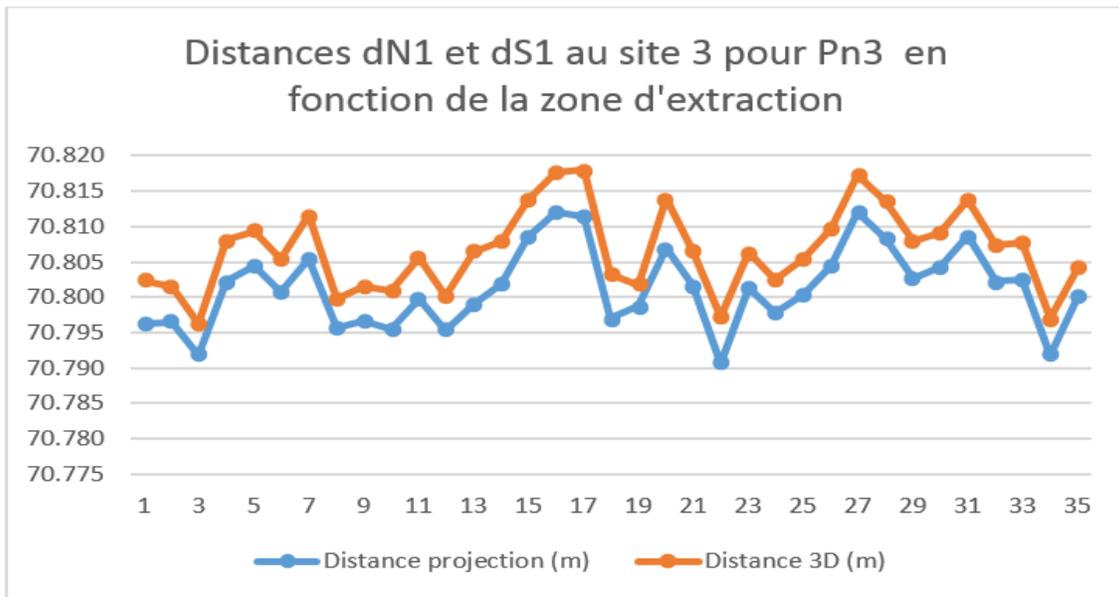


FIGURE 3.37 – Distances, au Pn3, entre les murs nord et sud obtenues avec la SX10

Comme on peut le constater, l'ordre de grandeur des écarts transversaux des centroïdes (tableau 3.34) n'aura pas d'influence significative au niveau des distances calculées entre les deux tours. Le tableau (3.35) présente les distances calculées entre les 2 paires de centroïdes au site 5.

TABLEAU 3.34 – Écart transversal maximum pour Pn1, Pn2 et Pn3

Pn	Tour	Écart transversal maximum (Et)
1	sud	0.24
	nord	0.02
2	sud	0.03
	nord	0.07
3	sud	0.12
	nord	0.13

TABLEAU 3.35 – Distances dN et dS au site 5 : vérité terrain

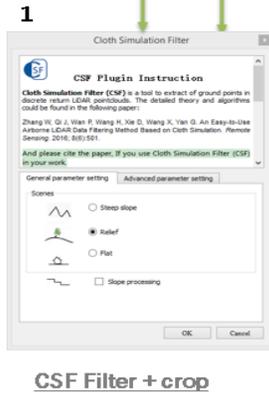
Zone	Distance projection (m)	Distance 3D (m)
1	22.916	22.919
2	22.892	22.895

Les étapes menant à la validation des résultats après application des paramètres d'angles de visée sont présentés à la figure (3.38). Lorsque les nuages de points en levé dynamique du MX2 seront corrigés en appliquant les valeurs finales déterminées, ces nuages de points seront exportés directement en las1.2 pour être comparés (étape 3) avec les nuages du SX10 en utilisant l'outil C2C (Cloud2cloud Distance Computation) du logiciel CloudCompare.

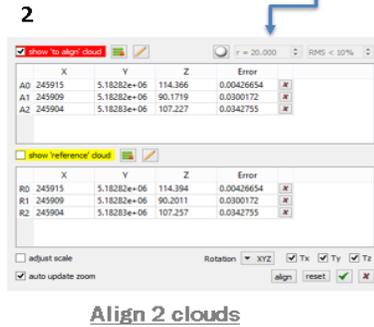
Étapes de validation des résultats

Filtrage et segmentation

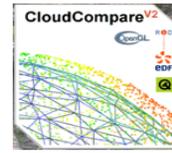
Nuage MX2 ajusté
Nuage SX10



Alignement des nuages



SX10 vs MX2 Procédure traitement



Analyse de performance

3 C2C comparaison nuage à nuage

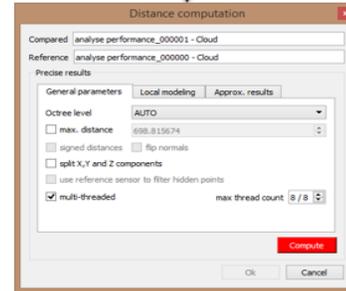


FIGURE 3.38 – Workflow de validation des résultats avec CloudCompare

La figure (3.38) présente trois différentes étapes menant à la comparaison de deux nuages de points. La première étape consiste à effectuer un filtrage pour conserver uniquement les éléments à comparer, soit les surfaces planes dans notre cas. La deuxième étape consiste à ramener les nuages de points à comparer dans le même système de coordonnées. Dans notre cas, ces nuages de points sont référencés dans la projection MTM fuseau 7 SCOPQ. La dernière étape consiste à calculer la distance orthogonale de chaque point du nuage de référence par rapport à son binôme dans le nuage à comparer en supposant que ce point appartient à un plan défini par son voisinage de 1.5m de rayon.

Les paramètres de la normale au plan d'ajustage statique ont été déterminés en utilisant la méthode RANSAC dans Cloud Compare et en utilisant un moindre carré de Deming. Les résultats obtenus sont similaires (tableau 3.36). La figure (3.39) permet de voir le nuage de points dont les observations suivent une loi normale centrée.

TABLEAU 3.36 – Estimation de la normale au plan d’ajustage site1

Méthode	RANSAC	Deming
Nombre de points	715 618	401
a	-0.626	-0.626
b	0.780	0.780
c	0.000	0.000

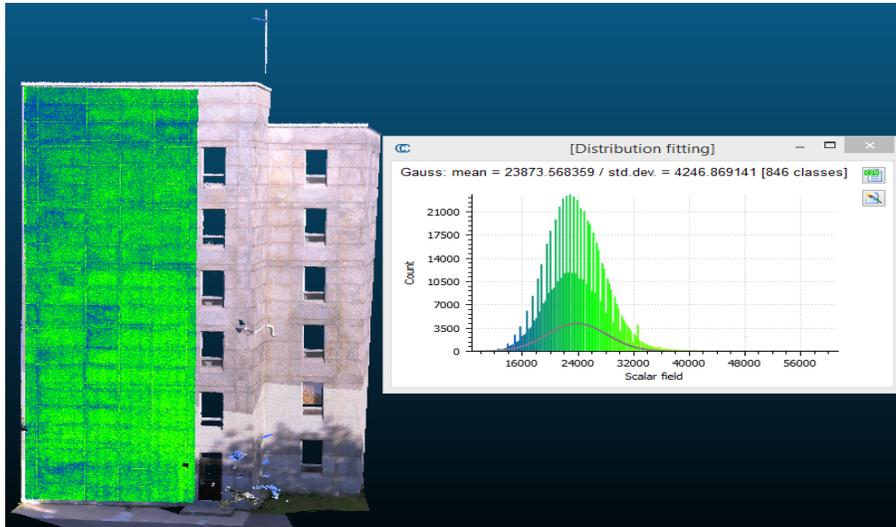


FIGURE 3.39 – Distribution gaussienne des points lidar, du plan d’ajustage statique, acquis avec la SX10, CloudCompare

Chapitre 4

Présentation des résultats expérimentaux

Le chapitre précédent a détaillé les étapes menant à l'acquisition, au traitement et à l'extraction des données nécessaires pour répondre aux aspects liés à la méthodologie. Les formules et routines présentées constituent la librairie d'outils qui a permis, entre autres, de transformer et d'adapter les données brutes du MX2 pour l'ajustage des angles de visée. Elle a aussi permis de valider certaines hypothèses de recherche et d'analyser la justesse des mesures du scanneur lidar. Ce chapitre présente l'ensemble des résultats qui ont été obtenus pour répondre aux différents aspects de la méthodologie. Parmi ces résultats, on retrouve les valeurs finales de roulis, tangage et lacet du scanneur aux différentes dates de levé. Des résultats de l'ajustement de la latence POS-lidar sont aussi présentés et pour terminer, les résultats obtenus à partir des données du MX2 et de la SX10 pour l'évaluation du biais de portée sont présentés et commentés.

4.1 Données lidar mobile MX2 pour l'estimation des angles de visée

Les valeurs finales du SLM déterminées pour chaque date de levé statique seront présentées avec cinq solutions. Pour ces solutions, aucune modification n'est apportée à la distance brute mesurée par le scanneur.

- Solution 1 avec les performances du POS LV annoncées par le fabricant, soit 0.03° 0.03° 0.2°
- Solution 2 en utilisant les valeurs de la solution 1 comme angles approchés
- Solution 3 en contraignant les paramètres A, B, C du plan d'ajustage
- Solution 4 avec les performances du POS LV en temps réel fourni par Trident, approximativement 0.02° 0.02° 1°

— Solution 5 en utilisant les angles d’attitude posttraités et leur incertitude (POSPac)

En utilisant les valeurs d’orientations relatives fournies par le fabricant, tableau (3.2), l’estimation numérique des angles de visée permet d’obtenir les valeurs finales des angles de montage du MX2, soit les trois angles ϕ_b θ_b ψ_b communément appelés roulis, tangage et lacet du scanner.

Les solutions 1 à 3 ont été déterminées en utilisant les mêmes incertitudes annoncées au tableau (3.1) pour les angles de navigation. Ces valeurs (0.02° 0.02° 0.2°) sont des performances typiques qui correspondent bien au mode de levé utilisé lors de l’acquisition des observations pour l’ajustage des angles de visée. Il est intéressant de vérifier si leur utilisation est réellement adaptée au contexte. Cela aurait comme avantage par exemple de se passer des incertitudes en temps réel fournies par POS LV pour alimenter rapidement le modèle stochastique du programme d’ajustage. Cependant, les incertitudes en temps réel représentent plus fidèlement la qualité des données en tenant compte des variables d’état du filtre de Kalman (biais des accéléromètres et des gyroscopes) qui changent dans le temps et sont déterminés après l’alignement fin. Les solutions 4 et 5 permettent ainsi de vérifier si les incertitudes associées aux angles d’attitude mesurés demeurent les meilleurs estimateurs pour l’ajustage des angles de visée.

4.1.1 Résultats de l’acquisition du 12 octobre 2017

TABLEAU 4.1 – Levé du 12 octobre 2017, Patron de 36 stations, Solution 1 à 5

	Solution 1	Solution 2	Solution 3	Solution 4	Solution 5
Valeurs approchées (deg)	0 0 180	Solution 1	0 0 180	0 0 180	0 0 180
ϕ_b roulis (deg)	-0.35	-0.35	-0.35	-0.23	-0.30
θ_b tangage (deg)	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06
ψ_b lacet (deg)	180.06	180.06	180.06	180.06	180.05
σ_{roulis}	0.04	0.04	0.04	0.02	0.00
σ_{tangage}	0.04	0.04	0.04	0.01	0.01
σ_{lacet}	0.07	0.07	0.07	0.02	0.01
S_0^2	1.00	0.99	0.99	1.00	0.70
Nb. points moyen par ligne	3686	3686	3686	3686	5585

Les résultats obtenus pour les 3 premières solutions sont identiques. Cela est encourageant et permet de déduire que les valeurs approchées fournies par le fabricant sont de bonne qualité. De plus, l’estimation de la normale au plan à partir des observations (v_{bL}) donne de bons résultats sans contrôle de la part de l’utilisateur. Les incertitudes associées aux angles d’attitude en temps réel (POS LV) ou à ceux posttraités (POSPac) sont comparables en roulis

et en tangage d'après les résultats présentés à l'annexe B et à l'annexe C. Cependant, on peut s'apercevoir que le roulis estimé du scanneur est légèrement différent. Lors de l'analyse, des facteurs responsables de changement seront explorés. Néanmoins, les valeurs estimées sont du même ordre de grandeur. Le lacet estimé entre les deux solutions est comparable quoique très souvent les incertitudes associées à cet angle sont différentes en pratique entre les valeurs en temps réel et les valeurs posttraitées.

4.1.2 Résultats de l'acquisition du 17 mai 2018

Patron de lignes de 16 stations

Pour obtenir un plan d'expérience pour l'ajustage des angles de visée, le patron de lignes de 16 stations proposé au chapitre 3 est mis à l'essai pour comparer de manière pratique les performances pouvant être obtenues. Dans ce contexte, deux levés d'ajustage statique sont présentés pour cette date.

TABLEAU 4.2 – Levé du 17 mai 2018, Patron de 16 stations, Solution 1 à 5

	Solution 1	Solution 2	Solution 3	Solution 4	Solution 5
Valeurs approchées (deg)	0 0 180	Solution 1	0 0 180	0 0 180	0 0 180
ϕ_b roulis (deg)	-0.26	-0.26	-0.26	-0.26	-0.27
θ_b tangage (deg)	-0.06	-0.06	-0.06	-0.06	0.08
ψ_b lacet (deg)	179.83	179.83	179.83	179.85	180.06
σ_{roulis}	0.04	0.04	0.04	0.01	0.01
σ_{tangage}	0.12	0.12	0.12	0.11	0.05
σ_{lacet}	0.47	0.47	0.47	0.46	0.25
S_0^2	1.00	0.99	0.99	1.00	0.42
Nb. points moyen par ligne	7275	7275	7275	7275	7302

À première vue, les valeurs estimées en tangage et en lacet sont très éloignées des valeurs de 36 stations. On peut très brièvement conclure que ce changement est lié au nombre de stations statiques. En effet, plus de 55% des stations ont été éliminées pour tenter d'estimer les angles de visée. Le roulis estimé du scanneur demeure néanmoins inchangé. Les trois premières solutions se répètent comme au cas précédent. Il est intéressant de noter que l'écart-type de la solution estimée réagit d'une manière alarmante pour les deux angles problématiques comparés au cas du roulis. En effet, l'incertitude sur la valeur estimée est supérieure à l'ordre de grandeur de l'angle de visée. Les écarts-types de la solution 4 demeurent encore élevés. Cela permet de déduire que l'origine du changement des valeurs estimées ne provient pas des incertitudes associées. En utilisant les données de navigation posttraitées comme observations pour l'ajustage, la solution 5 obtenue apporte des valeurs qui se rapprochent plus des valeurs

du levé précédent. Cette fois-ci les écarts-types associés dans le cas du tangage et du lacet sont plus faibles de moitié.

Patron de lignes de 36 stations

TABLEAU 4.3 – Levé du 17 mai 2018, Patron de 36 stations, Solution 1 à 5

	Solution 1	Solution 2	Solution 3	Solution 4	Solution 5
Valeurs approchées (deg)	0 0 180	Solution 1	0 0 180	0 0 180	0 0 180
ϕ_b roulis (deg)	-0.31	-0.31	-0.31	-0.32	-0.32
θ_b tangage (deg)	0.06	0.06	0.06	0.07	0.09
ψ_b lacet (deg)	180.10	180.10	180.10	180.05	180.02
σ_{roulis}	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00
σ_{tangage}	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01
σ_{lacet}	0.04	0.04	0.04	0.01	0.02
S_0^2	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00
Nb. points moyen par ligne	6373	6373	6373	6373	8308

On note dans ce cas-ci une forte ressemblance des résultats de ce levé avec ceux du levé du 12-10-2017 qui comporte le même nombre de stations. Les solutions 1 à 3 demeurent constantes avec des valeurs proches, ce qui correspond aux attentes. Le roulis estimé du scanneur (solution 4) a plus de ressemblance aux autres solutions comparé au levé du 12-10-2017. Pour la solution 5, le lacet semble plus petit et le tangage plus grand. La corrélation entre ces deux angles est réellement palpable. Cela n'est pas surprenant, car on sait que pour le patron de lignes l'observabilité du tangage dépend des stations rasantes (lacet) alors que celle du lacet dépend à la fois du tangage et de la rasance. La géométrie du MX2 dont l'axe transversal (direction du cap) et l'axe de tangage sont alignés pourrait aussi être en cause.

4.1.3 Résultats de l'acquisition du 24 mai 2018

TABLEAU 4.4 – Levé du 24 mai 2018, Patron de 16 stations, Solution 1 à 5

	Solution 1	Solution 2	Solution 3	Solution 4	Solution 5
Valeurs approchées (deg)	0 0 180	Solution 1	0 0 180	0 0 180	0 0 180
ϕ_b roulis (deg)	-0.30	-0.30	-0.30	-0.30	-0.29
θ_b tangage (deg)	0.03	0.03	0.03	0.03	0.17
ψ_b lacet (deg)	180.39	180.39	180.39	180.39	180.00
σ roulis	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
σ tangage	0.05	0.05	0.05	0.05	0.01
σ lacet	0.13	0.13	0.13	0.13	0.04
S_0^2	0.51	0.50	0.50	1.00	0.72
Nb. points moyen par ligne	4167	4167	4167	4167	3801

Pour l'ajustement des angles en utilisant 16 stations, on remarque comme pour le 17-05-2018 que les valeurs estimées en tangage et en lacet sont très éloignées des valeurs de 36 stations. On peut confirmer que ce changement est très probablement lié au nombre de stations statiques. Le roulis estimé du scanneur demeure néanmoins très proche de l'ensemble des valeurs estimées pour les différents levés. Ce patron de lignes indique clairement qu'un certain nombre d'observations ne sont pas contrôlées, car la redondance est plus faible. Néanmoins, de manière locale, les trois premières solutions se répètent et l'écart-type fournit de plus une bonne indication de l'incertitude des valeurs estimées.

En comparant les écarts-types entre les deux solutions du 17-05-2018 et du 24-05-2018, on s'aperçoit que celle de la solution 4 a baissé de moitié (ordre de grandeur) pour la valeur estimée de tangage. Ceci donne une bonne indication que la vraie valeur de tangage est probablement de signe positif. On remarque la même tendance pour l'écart-type du lacet. Les solutions 1 à 4 sont identiques. Cela permet de déduire que l'origine du changement des valeurs estimées ne provient pas des incertitudes associées aux angles d'attitude. En utilisant les données de navigation posttraitées comme observations pour l'ajustage, la solution 5 apporte des valeurs semblables dans le cas du roulis (cf. tableau 4.4 et tableau 4.2). Le tangage estimé est du double de la valeur estimée au 17-05-2018 et le lacet n'a presque pas subi de correction par rapport à la valeur d'origine. Ceci indique encore une fois une forte corrélation entre ces deux angles de visée.

4.1.4 Résultats de l'acquisition du 12 juin 2018

Patron de lignes de 16 stations

TABLEAU 4.5 – Levé du 12 juin 2018, Patron de 16 stations, Solution 1 à 5

	Solution 1	Solution 2	Solution 3	Solution 4	Solution 5*
Valeurs approchées (deg)	0 0 180	Solution 1	0 0 180	0 0 180	0 0 180
ϕ_b roulis (deg)	-0.31	-0.31	-0.31	-0.32	-
θ_b tangage (deg)	0.01	0.01	0.01	0.00	-
ψ_b lacet (deg)	180.35	180.35	180.35	180.36	-
σ_{roulis}	0.02	0.02	0.02	0.01	-
σ_{tangage}	0.07	0.07	0.07	0.06	-
σ_{lacet}	0.19	0.19	0.19	0.18	-
S_0^2	1.02	1.02	1.02	1.00	-
Nb. points moyen par ligne	5891	5891	5891	5891	-

* Les données de navigation de ce levé sont corrompues et non pas pu être traitées par POSPac. Par conséquent, il n'y a pas de solution 5.

En comparant le tableau (4.5) au tableau (4.4), on remarque que le patron de ligne de 16 stations fournit les mêmes valeurs finales que le levé du 24 mai 2018. Les écarts-types associés à ces valeurs sont aussi du même ordre de grandeur. Les performances du patron de lignes semblent cohérentes d'une part. D'autre part, cela implique que le nombre de stations n'est pas suffisant pour estimer les angles de visée avec précision.

Patron de lignes de 36 stations

TABLEAU 4.6 – Levé du 12 juin 2018, Patron de 36 stations, Solution 1 à 5

	Solution 1	Solution 2	Solution 3	Solution 4	Solution 5*
Valeurs approchées (deg)	0 0 180	Solution 1	0 0 180	0 0 180	0 0 180
ϕ_b roulis (deg)	-0.30	-0.30	-0.30	-0.29	-
θ_b tangage (deg)	0.08	0.08	0.08	0.09	-
ψ_b lacet (deg)	180.08	180.08	180.08	180.17	-
σ roulis	0.02	0.02	0.02	0.00	-
σ tangage	0.02	0.02	0.02	0.01	-
σ lacet	0.03	0.03	0.03	0.01	-
S_0^2	1.76	1.76	1.76	0.56	-
Nb. points moyen par ligne	6738	6738	6738	6738	-

* Les données de navigation de ce levé sont corrompues et non pas pu être traitées par POSPac. Par conséquent il n'y a pas de solution 5.

En comparant les tableaux précédents du patron de lignes de 36 stations (4.1 et 4.3) aux résultats obtenus pour cette date, on remarque une bonne continuité entre les valeurs finales estimées en roulis, tangage et lacet. De plus, l'écart-type est semblable. Les solutions 1 à 3 demeurent inchangées localement comme déjà notées dans les cas précédents.

4.1.5 Résultats de l'acquisition du 21 août 2018

Patron de lignes de 16 stations

TABLEAU 4.7 – Levé du 21 août 2018, Patron de 16 stations, Solution 1 à 5

	Solution 1	Solution 2	Solution 3	Solution 4	Solution 5
Valeurs approchées (deg)	0 0 180	Solution 1	0 0 180	0 0 180	0 0 180
ϕ_b roulis (deg)	-0.38	-4.66	-0.38	-5.53	-0.36
θ_b tangage (deg)	-0.45	-3.04	-0.45	-3.73	-0.31
ψ_b lacet (deg)	183.16	71.72	183.16	71.51	181.33
σ roulis	0.14	2.47	0.14	2.49	0.08
σ tangage	0.54	1.52	0.54	1.05	0.23
σ lacet	1.23	3.83	1.23	3.75	0.50
S_0^2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Nb. points moyen par ligne	9264	9264	9264	9264	13578

On remarque que le patron de ligne de 16 stations fournit cette fois-ci des valeurs très différentes des autres valeurs répétées jusqu'ici. Il y a probablement une perturbation causée par un facteur externe à l'ajustement et qui s'ajoute à un nombre de stations insuffisant pour estimer les angles de visée. Comme on peut remarquer, la solution 2 donne des valeurs complètement absurdes connaissant les valeurs approchées qui sont de bonne qualité. Cela explique que les valeurs estimées à la solution 1 ne sont pas de bonne qualité cette fois-ci, car elles sont utilisées comme valeurs approchées dans la solution 2. L'estimation de la normale au plan ne pose pas de problème d'après les résultats obtenus pour la solution 3 qui sont les mêmes que pour la solution 1. Les écarts-types types indiquent bien un problème sur le résultat des valeurs finales obtenues. Ce facteur inconnu semble avoir moins d'impact sur le roulis comparé au tangage et au lacet. La solution 5 indique que le posttraitement des observations de navigation améliore significativement l'écart-type des valeurs estimées en lacet et tangage, mais aussi l'ordre de grandeur des angles de visée pour celles-ci. Ce facteur a un lien avec les angles d'attitude en temps réel comparé à ceux posttraités.

Patron de lignes de 36 stations

TABLEAU 4.8 – Levé du 21 août 2018, Patron de 36 stations, Solution 1 à 5

	Solution 1	Solution 2	Solution 3	Solution 4	Solution 5
Valeurs approchées (deg)	0 0 180	Solution 1	0 0 180	0 0 180	0 0 180
ϕ_b roulis (deg)	-0.25	-0.25	-0.25	-0.28	-0.34
θ_b tangage (deg)	0.12	0.12	0.12	0.15	0.08
ψ_b lacet (deg)	179.90	179.90	179.90	179.98	180.02
σ_{roulis}	0.07	0.07	0.07	0.02	0.01
σ_{tangage}	0.08	0.08	0.08	0.02	0.02
σ_{lacet}	0.14	0.14	0.14	0.04	0.03
S_0^2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Nb. points moyen par ligne	8279	8279	8279	8279	8494

L'utilisation d'un patron de lignes de 36 stations montre bien la faiblesse du patron de lignes de 16 stations en comparant les valeurs finales estimées. La redondance des observations donne plus de poids à l'incertitude des valeurs finales estimées. Cette fois-ci, on remarque que la solution 2 est plus stable comparée à ce qu'on remarque pour le patron de lignes de 16 stations. En effet, les valeurs approchées ont une meilleure qualité vis-à-vis de celles que l'on connaît déjà. Néanmoins, il reste un facteur inconnu qui nuit à la justesse des valeurs finales pour le lacet, car les écarts-types du roulis et du tangage sont moindres et les valeurs estimées sont écartées des résultats fournis par le patron de ligne de 36 stations pour les levés du 12-10-2017, du 17-05-2018 et du 12-06-2018. La solution 4 qui utilise les incertitudes fournies par

POS LV, pour les angles d'attitude, fournit des écarts-types meilleurs et des valeurs finales qui tendent vers celles de la solution 5. L'utilisation des angles d'attitude posttraités, offre des valeurs finales plus comparables aux résultats fournis par le patron de ligne de 36 stations pour les levés du 12-10-2017, du 17-05-2018 et du 12-06-2018. Cela permet de confirmer que le facteur externe qui nuit aux solutions 1 à 4 est bien lié aux angles d'attitude en temps réel mesurés par l'IMU. L'analyse détaillée des résultats au chapitre 6 permettra de mieux éclairer ce problème.

4.2 Données lidar mobile pour l'estimation de la latence

Les résultats obtenus pour l'estimation de la latence au site 4 sont présentés au tableau (4.9). Les distances de décalage ont été calculées pour chaque plan aux tableaux (3.24 et 3.25) et la distance moyenne utilisée pour calculer la latence au tableau (3.26). Le logiciel Trident permet de mesurer la valeur du décalage avec une résolution millimétrique. Les valeurs de décalage obtenues pour les plans S2 et S3 sont très proches. Quant aux vitesses obtenues avec POSPac, la résolution temporelle est de 5ms, ce qui correspond à la fréquence maximale d'échantillonnage de l'IMU. Les valeurs de vitesse à chaque époque varient en moyenne de 0.6cm/s. Finalement la latence estimée est presque identique pour les deux plans. L'analyse détaillée faite au chapitre suivant permet de mieux comprendre la portée de ces résultats.

TABLEAU 4.9 – Latence POS-lidar estimée au site 4

Plan	Distance ortho moy. (cm)	Vitesse moy. (m/s) POS-Pac	Latence (s)	Incertitude = 1/LPS (s)
S2	1.125	0.58	0.05	0.1
		0.80		
S3	1.114	0.72	0.04	0.1
		0.43		

4.3 Données lidar mobile pour l'estimation du biais de portée

Les distances moyennes dans la projection et la distance moyenne 3D calculées entre les deux tours pour le site 3 sont présentées au tableau (4.10). Ces distances ont été estimées à partir des graphiques (3.25) à (3.27). Les distances aux positions Pn1 et Pn3 sont plus rapprochées et plus courtes contrairement à celles présentées à la position Pn2. La distance 3D est légèrement plus élevée de quelques millimètres dans les trois cas. Ceci est normal, car les centroïdes ne sont pas à la même hauteur. On constate que l'écart-type relié à ces distances est de l'ordre de 1 à 2cm. Ceci correspond environ à l'incertitude de mesure annoncée par le fabricant, soit 1cm à 50m sur un papier Kodac de couleur blanche. Cette différence pour les distances du

Pn2 sera étudiée. La portion des murs utilisés pour les calculs est d'environ 51m de long pour la tour sud et 50m de long pour la tour nord. Cela représente théoriquement environ 1 cm d'erreur sur la distance réelle. Cela n'affecte en rien les résultats, car les données lidar de la SX10 ont les mêmes caractéristiques, soit 51m de long pour la tour sud et 50m pour la tour nord.

TABLEAU 4.10 – Distances moyennes projection et 3D associées aux écarts-types au site 3

Position	Moyenne Dp (m)	Écart-type (m)	Moyenne D3D (m)	Écart-type (m)
Pn1	70.751	0.013	70.756	0.014
Pn2	70.784	0.012	70.789	0.012
Pn3	70.745	0.017	70.750	0.016

Compte tenu de l'impossibilité de calculer les distances aux 35 zones ciblées pour le MX2 causée par les obstructions (arbres), les 24 zones de recoupement entre les trois positions du MX2 sont conservées pour calculer les écarts par rapport aux données de la SX10. Les graphiques (4.1) à (4.3) présentent ces écarts pour les 24 zones les plus hautes du mur. De plus, étant donné que les écarts en 2D sont du même ordre de grandeur que celles en 3D (au millimètre près), l'analyse est portée sur ces dernières. Ces valeurs donnent déjà une bonne idée de la justesse du scanneur. Une tendance se remarque évidemment sur la variation de ces écarts. En effet, plus la zone d'extraction est haute, plus l'écart est moindre. Autrement dit, plus la distance mesurée par le scanneur est grande, plus l'écart est petit. Cette remarque est valable seulement pour les distances aux positions Pn1 et Pn3. À la position Pn2, cet écart est variable entre les différentes zones. Le tableau (3.27) permet d'expliquer cette différence pour la position Pn2. Il est à noter aussi que la fidélité des mesures au Pn1 est plus grande que celle des positions 2 et 3, car le temps d'acquisition est 7 fois plus long (tableau 3.14). Ces écarts ont aussi été calculés pour les zones 24 à 35 qui ne sont pas présentés, mais la tendance remarquée est pareille.

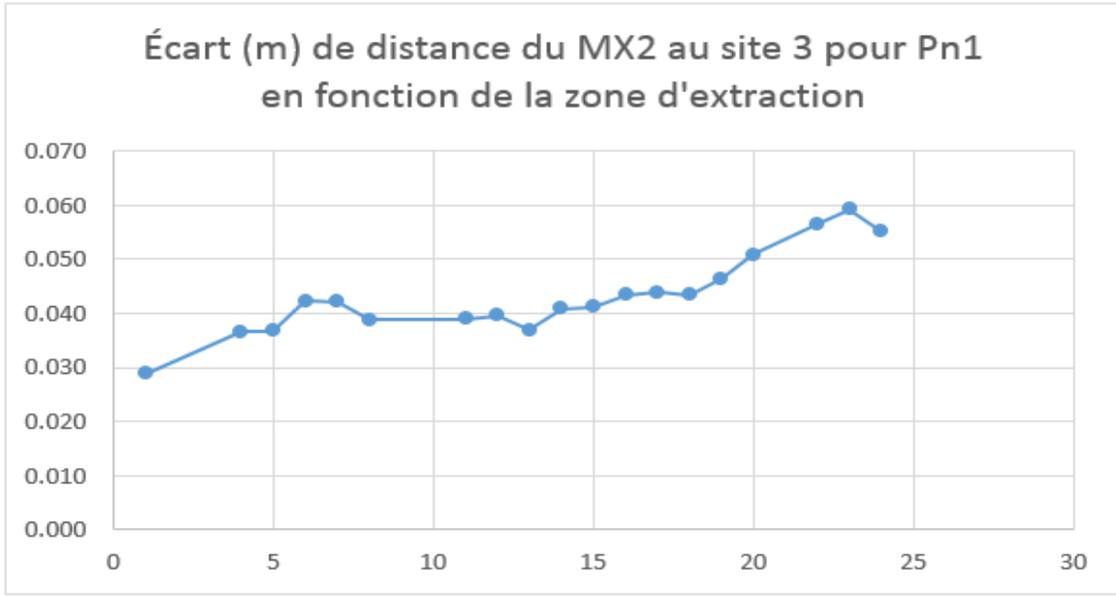


FIGURE 4.1 – Écarts, au Pn1, entre les données du MX2 et de la SX10

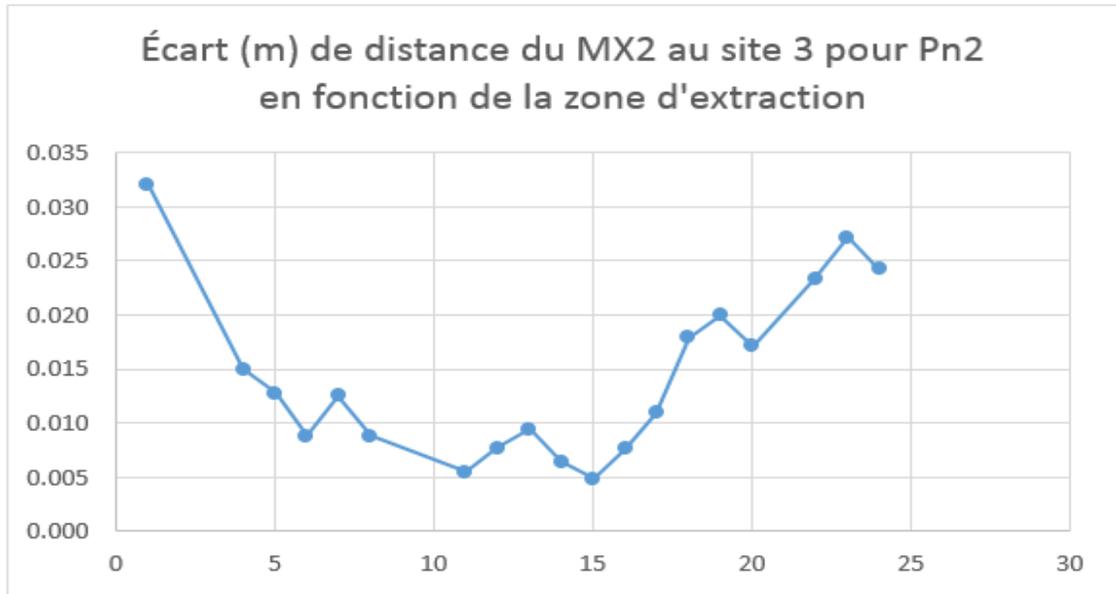


FIGURE 4.2 – Écarts, au Pn2, entre les données du MX2 et de la SX10

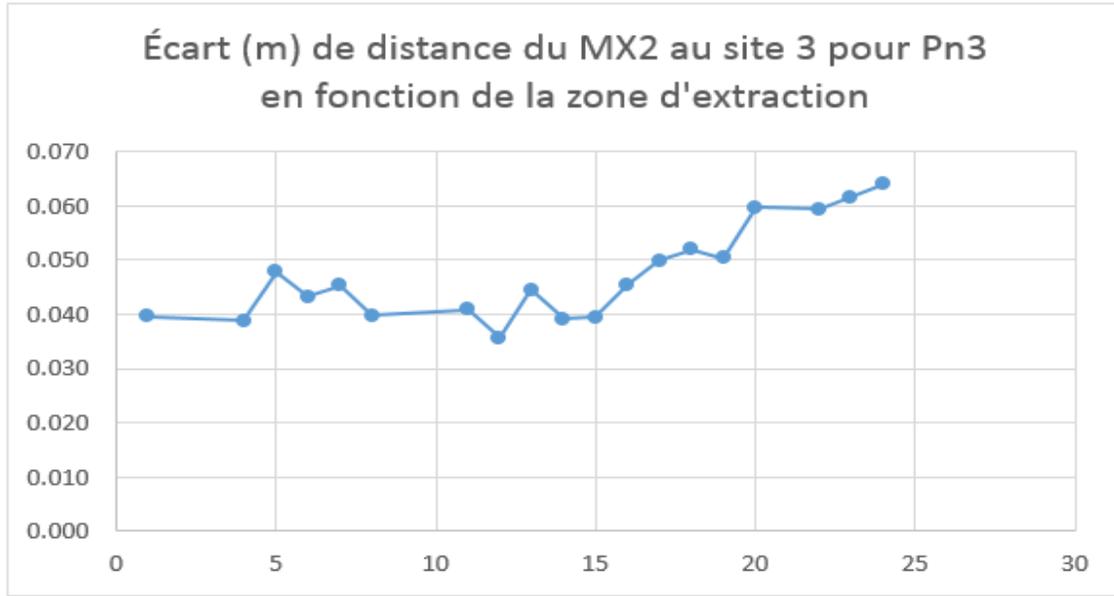


FIGURE 4.3 – Écarts, au Pn3, entre les données du MX2 et de la SX10

Le tableau (4.11) présente la moyenne des écarts pour chaque position au site 3. Il est bien certain que le scanneur mesure une distance plus courte à chaque endroit. Il y a bien évidemment dans ce cas un systématisme de mesure du scanneur tel qu'identifié par Landry (2017). La divergence au niveau de la position Pn2 reste à éclairer dans le cadre d'une analyse plus détaillée.

TABLEAU 4.11 – Moyenne des écarts de distances du MX2 au site 3

Position	Moyenne Écarts (m)	Écart-type (m)	Distance vraie (m)
Pn1	-0.043	0.008	70.801
Pn2	-0.014	0.008	70.801
Pn3	-0.047	0.009	70.801

Les distances moyennes dans la projection et la distance moyenne 3D calculées entre les deux murs pour le site 5 sont présentées au tableau (4.12). Ces distances ont été estimées à partir du tableau (3.28). Étant donné que ces murs sont plus rapprochés comparés au site 3, une seule position a été occupée, lors de l'acquisition, à mi-chemin entre les cibles. On constate que l'écart-type relié à ces distances est de l'ordre de 1cm, ce qui correspond au constat effectué au site 3. La portion des murs utilisés pour les calculs est de 2.6 mètres de long. Cela est aussi vrai pour les données lidar de la SX10. On note que contrairement au site 3, ces écarts ne montrent aucune tendance liée à la hauteur. Ceci est évidemment acceptable

et compréhensible, car la longueur des deux murs représente $1/19^{me}$ de celle des deux tours. L'écart noté est très ponctuel, toutefois l'ordre de grandeur de cette valeur est environ du triple comparé au site 3. Il est probable que le biais de portée n'est pas constant. Une partie de l'erreur de mesure est en fonction de la distance mesurée dans ce cas.

TABLEAU 4.12 – Distances moyennes projection et 3D associées aux écarts-types au site 5

Position	Moyenne Dp (m)	Écart-type (m)	Moyenne D3D (m)	Écart-type (m)
Pn	22.766	0.013	22.769	0.012

TABLEAU 4.13 – Écarts de distances en 3D au site 5 : portée brute

Nuage	Zone	Écart (m)
Record0	1	-0.141
	2	-0.139
Record1	1	-0.140
	2	-0.138
Record2	1	-0.138
	2	-0.136
Record3	1	-0.136
	2	-0.134

Pour mieux vérifier cette hypothèse, la mise en application de la correction proposée par Landry (2017) a été effectuée. Celui-ci pose comme hypothèse dans sa démarche que l'erreur de portée est une valeur constante et que dans ce contexte, une valeur de correction unique permet réellement d'atténuer cette erreur. Ceci est difficile à prouver dans un contexte d'ajustage en laboratoire compte tenu des distances relativement courtes. Pour une distance entre deux murs, séparée de 9m à l'intérieur, la moyenne des écarts notés par l'auteur lors de ses expériences en laboratoire est de l'ordre de 7.5cm. Au site 5, la distance entre les murs est 2.5 fois plus grande et la moyenne des écarts constatés au tableau (4.14) est 2 fois plus grande. Les facteurs ne correspondent pas exactement néanmoins, les valeurs sont fortement corrélées. Pour déterminer d'où vient cette divergence, la correction de 5 cm (tableau 1.4) est appliquée à la série des observations lidar mobile du site 5 à des fins de comparaison.

TABLEAU 4.14 – Moyenne des écarts de distances du MX2 au site 5 sans correction

Position	Moyenne Écarts (m)	Écart-type (m)	Distance vraie (m)
Pn	-0.138	0.002	22.907

Les distances moyennes dans la projection et la distance moyenne 3D calculées entre les deux murs pour le site 5 sont présentées au tableau (4.15). Ces distances ont été estimées à partir du tableau (3.29). Le tableau (4.16) présente les écarts pour les zones 1 et 2 du mur. En tenant compte de la correction constante appliquée, on note encore des écarts dont la moyenne tourne autour de 3.4cm, ce qui permet d'affirmer l'hypothèse selon laquelle le biais de portée est soumis à un facteur d'échelle est vraie.

TABLEAU 4.15 – Distances moyennes projection et 3D associées aux écarts-types au site 5 : portée corrigée (Landry2017)

Position	Moyenne Dp (m)	Écart-type (m)	Moyenne D3D (m)	Écart-type (m)
Pn	22.867	0.012	22.874	0.013

TABLEAU 4.16 – Écarts de distances en 3D au site 5 : portée corrigée (Landry2017)

Nuage	Zone	Écart (m)
Record0	1	-0.037
	2	-0.035
Record1	1	-0.036
	2	-0.034
Record2	1	-0.034
	2	-0.033
Record3	1	-0.032
	2	-

TABLEAU 4.17 – Moyenne des écarts de distances du MX2 au site 5 avec correction (Landry2017)

Position	Moyenne Écarts (m)	Écart-type (m)	Distance vraie (m)
Pn	-0.034	0.002	22.907

4.3.1 Comparaison avec les données de la SX10

Pour évaluer la performance du SLM, les données collectées pour l'analyse du biais de portée doivent être comparées avec des données de référence fiables et exactes. Pour cela, un scanner 3D est utilisé pour collecter ces données de référence dont on a besoin. Une présentation du scanner 3D Trimble SX10 et des données de référence collectées est effectuée à la section 4.3.

Les distances de référence mesurées avec la SX10 aux sites 3 et 5 sont présentées aux tableaux (4.18 et 4.19). On note une forte ponctualité des distances mesurées par rapport à la distance moyennée au site 3. Au site 5, les distances sont légèrement différentes entre les deux zones.

TABLEAU 4.18 – Distances moyennes projection et 3D associées aux écart-types au site 3

Position	Moyenne Dp (m)	Écart-type (m)	Moyenne D3D (m)	Écart-type (m)
1-2-3	70.801	0.006	70.806	0.006

TABLEAU 4.19 – Distances moyennes projection et 3D associées aux écart-types au site 5

Zone	Moyenne Dp (m)	Écart-type (m)	Moyenne D3D (m)	Écart-type (m)
1	22.916	0.003	22.919	0.003
2	22.892	0.003	22.895	0.003

Chapitre 5

Analyse des résultats

Au chapitre précédent, une comparaison de différentes solutions d’ajustage des angles de visée a été présentée. Les paramètres d’orientation IMU-lidar ont été présentés et commentés en fonction des différentes cueillettes de données réalisées. Des facteurs de perturbation des résultats ont aussi été soulevés et doivent être investigués. Cependant, une analyse préalable des estimateurs de qualité d’un ajustement aux moindres carrés doit être abordée. Comme mentionnées à la section validation du chapitre 3, la compatibilité et la répétabilité des paramètres obtenus pour le SLM MX2 sont aussi de bons indicateurs d’évaluation du résultat.

5.1 Angles de visée

5.1.1 Analyse du facteur de variance a posteriori

Les valeurs estimées pour chaque patron de ligne d’ajustage des angles de visée sont associées à des écarts-types calculés à partir de l’estimateur du facteur de variance et de la matrice de variance covariance des équations générales (équation 2.31). Tel que mentionné au chapitre 3, un test du khi deux est effectué pour vérifier si l’estimateur du facteur de variance S_0^2 est compatible avec les observations et le modèle fonctionnel pour valider l’ajustement par moindres carrés des angles de visée du SLM. Si la matrice de variance covariances décrit fidèlement le comportement des erreurs aléatoires associées aux observations alors le facteur de variance est supposé égal à 1 et son estimateur aussi. En effectuant le test du khi deux, on vérifie si l’estimateur est assez proche de 1. Une probabilité de 99% est fixée pour définir l’hypothèse H_0 (équation 2.32). Un facteur important de cette étape est le nombre de degrés de liberté de la série d’observations. Pour le patron de lignes de 36 stations, le degré de liberté est de 36-5, soit 31 et pour le patron de lignes de 16 stations, cette valeur est égale à 11. Pour toutes les solutions présentées au chapitre 5, le test de l’hypothèse nulle est un succès (cf. annexe F). Par conséquent, le comportement des observations par rapport au modèle est acceptable. Cela constitue une base de départ pour évaluer les solutions, mais on ne se limite pas seulement à cette indication. Toutefois, on constate que pour les différentes solutions

présentées, le poids des incertitudes est variable pour les valeurs finales.

5.1.2 Valeurs finales des cinq solutions proposées

Un facteur déterminant des paramètres estimés par ajustement aux moindres carrés est la connaissance des valeurs approchées utilisées pour initialiser les inconnues afin de calculer le vecteur de fermeture. Comme le démontrent les résultats (cf. tableaux 4.1 à 4.8), le comportement des solutions 2 et 3 est acceptable pour l'ensemble des collectes de données. L'objectif visé est de vérifier le bon fonctionnement de l'algorithme d'ajustage des angles de visée lorsque les valeurs approchées sont de qualité variable, mais néanmoins proche des valeurs finales que l'on cherche à estimer. La solution 2 a fourni les valeurs approchées des angles d'orientation IMU-lidar, tandis que la solution 3 a permis de vérifier s'il y a réellement un avantage de contrôler l'initialisation des paramètres de la normale au plan (α et β) au lieu de les estimer en utilisant le produit vectoriel de deux lignes de scan, le programme d'ajustement a été modifié afin d'utiliser la moyenne des valeurs obtenues en utilisant $n-1$ (15 ou 35) lignes de scan. On remarque en général que ces deux facteurs ne permettent pas d'expliquer le comportement des valeurs finales obtenues pour les deux types de patrons de lignes et pour les différentes dates de levé. On ne pourra donc pas les lier aux autres solutions. L'intérêt sera porté aux solutions 1, 4 et 5 dont les principales dissemblances sont les incertitudes liées aux angles d'attitude mesurés pour calculer la matrice de variance covariance des observations. Les observations des solutions 1 et 4 sont les mêmes alors que pour la solution 5, les angles d'attitude sont corrigés par posttraitement.

5.1.3 Répétabilité, compatibilité et incertitude des paramètres estimés

Patron de ligne de 16 stations

Il est possible de remarquer que ce patron permet d'estimer à partir des valeurs approchées, des valeurs finales acceptables pour le roulis. En effet, à trois reprises pour un total de quatre collectes, le roulis estimé est très proche (environ $0,05^\circ$ de variation) entre les collectes du 17 mai 2018, du 24 mai 2018 et du 12 juin 2018 (figure 5.1). La solution 5 du 21 août 2018 fournit néanmoins des valeurs proches de ces dernières. De plus, cette incertitude est comparable à celle des valeurs finales estimées à partir du patron de lignes de 36 stations (figure 5.2). En termes d'écart-type, ces valeurs finales sont compatibles pour cet angle. Le nombre de stations démontre un plan d'acquisition assez solide pour cet angle.

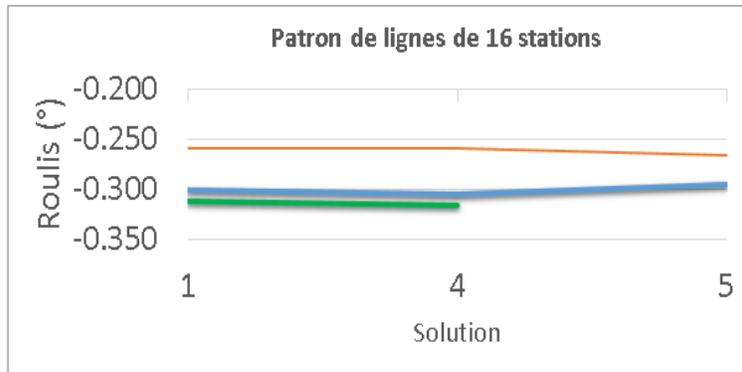


FIGURE 5.1 – Répétabilité du roulis avec 16 stations. Ligne orange, valeurs finales du 17-05-2018 ; ligne bleue, valeurs finales du 24-05-2018 ; et ligne verte, valeurs finales du 12-06-2018.

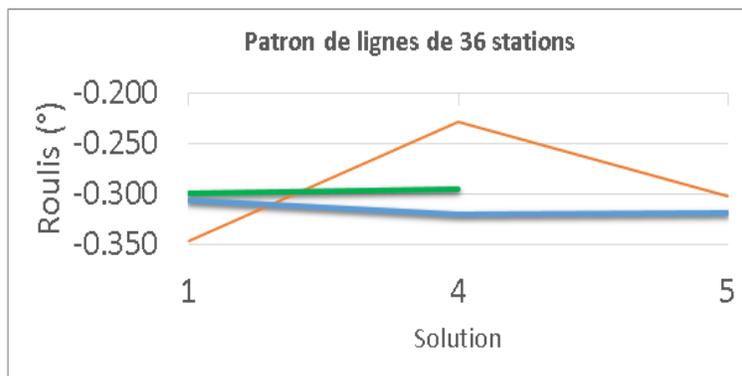


FIGURE 5.2 – Répétabilité du roulis avec 36 stations. Ligne orange, valeurs finales du 12-10-2017 ; ligne bleue, valeurs finales du 17-05-2018 ; et ligne verte, valeurs finales du 12-06-2018.

D'autre part, les valeurs estimées pour le tangage et le lacet sont moins répétables. Parmi les différentes collectes de 16 stations, on note des variations du lacet de l'ordre de 0.6° (solutions 1 et 4) et de l'ordre de 0.06° (solution 5) à la figure (5.3). Dans le cas du patron de lignes de 36 stations (figure 5.4), les variations sont de l'ordre de 0.05° lorsqu'on exclut la solution 4 du 12 juin. La collecte du 24 mai et celle du 12 juin présentent des valeurs finales proches et compatibles pour le lacet, mais qui ne sont pas acceptables vu les écarts-types associés très larges. Néanmoins cela ne s'applique que lorsqu'on prend en considération les solutions 1 et 4 qui utilisent des observations en temps réel pour les angles d'attitude. En effet, la solution 5 rapproche les valeurs finales estimées des collectes du patron de lignes en se servant des angles d'attitude posttraités. Toutefois, cette solution est à risque, car l'incertitude finale du lacet observé par l'IMU change de manière sensible. Il est donc important de se pencher sur les graphiques générés par POSpac aux annexes B et C pour comprendre en quoi cela crée un comportement différent des angles de visée estimés.

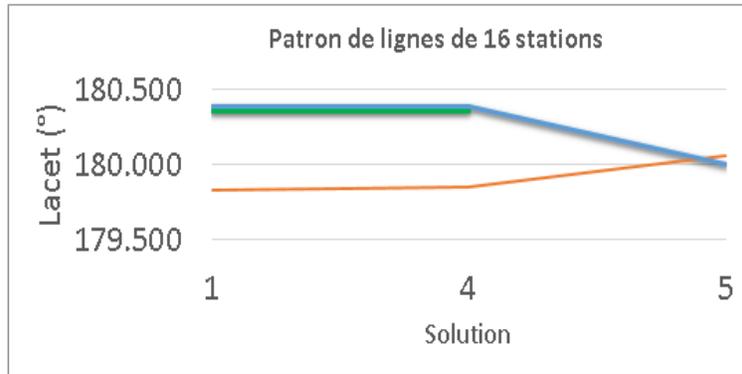


FIGURE 5.3 – Répétabilité du lacet avec 16 stations. Ligne orange, valeurs finales du 17-05-2018; ligne bleue, valeurs finales du 24-05-2018; et ligne verte, valeurs finales du 12-06-2018.

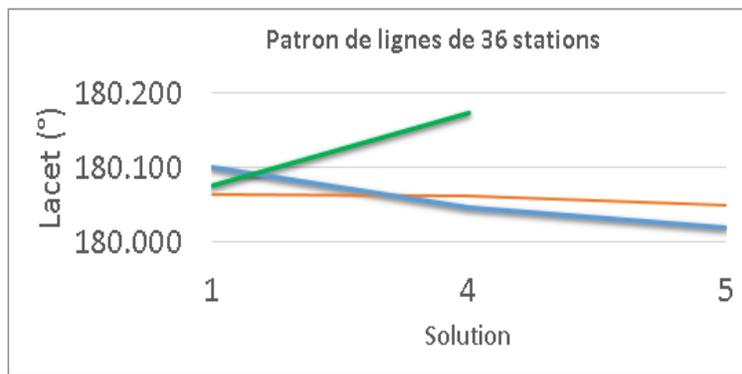


FIGURE 5.4 – Répétabilité du lacet avec 36 stations. Ligne orange, valeurs finales du 12-10-2017; ligne bleue, valeurs finales du 17-05-2018; et ligne verte, valeurs finales du 12-06-2018.

À l'annexe B, on note que l'incertitude (B4; B6; B8) en temps réel des angles d'Euler pour le roulis et le tangage est d'environ 2 minutes (environ 0.03°) pour les trois premières dates d'acquisition. En ce qui a trait au lacet, l'incertitude associée est du même ordre de grandeur entre ces dates. Elle est d'un ordre de grandeur entre 60 à 65 arc-minutes (environ 1°) au commencement du levé et se maintient tout au long. Par conséquent, celle-ci est environ 33 fois plus élevée que pour les angles de roulis et tangage. On remarque cependant que le levé du 17 mai 2018 (B4) présente une dégradation du lacet de 40' vers 95' dont l'explication est la dérive de l'IMU, pour retomber par la suite vers 70'. Cette incertitude demeure constante tout au long de la collecte de 36 stations. Suite à cela, aux alentours du temps écoulé 408200s, on constate un changement de comportement de la courbe de manière raide. Cela indique une amélioration de l'incertitude du lacet et en comparant avec l'incertitude obtenue avec les données posttraitées, on peut comprendre ce qui s'est réellement produit. Pour le 24 mai (B6), l'incertitude du lacet est constante (autour de 60') durant l'acquisition du patron de 16

stations. Pour le 12 juin (B8), l'incertitude est semblable à cette dernière (légèrement plus faible). Cela explique pourquoi les valeurs finales obtenues sont plus rapprochées. En temps réel, l'angle de lacet pour la position D le 24 mai (B5) et le 12 juin (B7) est le même soit 230° environ alors que pour le 17 mai (B3) cet angle est de 170° environ. Un patron de lignes de 36 et de 16 stations a aussi été observé le 12 juin (B7) comme dans le cas du 17 mai (B3). Et pourtant, l'angle de lacet observé par l'IMU pour la position D est le même dans les deux cas (environ 230°). Cela démontre une incohérence de la mesure de l'IMU.

Après posttraitement des angles d'attitude, l'incertitude (C4) du lacet est d'environ 20' pour le 17 mai jusqu'au temps écoulé 408200s. À partir de ce moment, on note une augmentation soudaine de l'incertitude. Cela indique que la précision de l'angle observé en temps réel est moindre à ce qu'on peut s'attendre en se fiant à l'incertitude en temps réel. On remarque pour le levé du 24 mai, que l'incertitude du lacet (C6) est d'environ 14' et demeure constante. Le levé du 12 juin n'ayant pas pu être posttraité aurait probablement le même comportement en se fiant aux valeurs finales proches.

En ce qui a trait aux angles d'attitude, on remarque après posttraitement que l'angle de lacet (C3) du 17 mai (170° environ) à l'époque 408200s est en déphasage d'environ 60° par rapport à celui (C5) de la position D du patron de lignes de 36 stations (230° environ). En effet, l'angle de lacet observé pour le 17 mai s'écarte de trop par rapport aux angles de référence définis au tableau (3.3), soit -60° d'écart. Pourtant, à cette position, il serait impossible de scanner le mur, car l'angle observé par l'IMU est rasant et la position du SLM est trop éloignée (figure 3.8). Le patron de ligne de 36 stations qui a été exécuté 12 mins avant ne présente pas cette anomalie. Par conséquent, seule la perturbation survenue au temps écoulé 408200s peut être à l'origine de cette erreur d'angle. Cette perturbation signifie que l'IMU a probablement perdu le nord. En effet, la conservation de l'alignement de l'IMU est en cause.

Lorsqu'on analyse les étapes d'acquisition, l'alignement statique et l'alignement fin ont bien été respectés et complétés avant le début du levé. La figure (5.5) montre la trajectoire du SLM sous forme de "8" dans 2 sens opposés. Cela correspond aux manoeuvres recommandées avant de faire le levé.

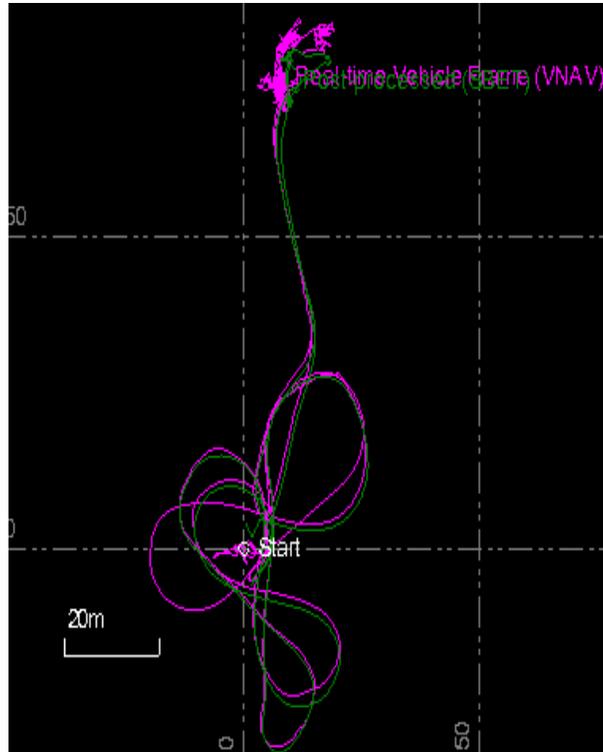


FIGURE 5.5 – Alignement fin de l’IMU du 17-05-2018. Ligne magenta : trajectoire en temps réel; ligne verte : trajectoire posttraitée.

Pour le levé du 21 août 2018, la même anomalie entre les angles d’attitude posttraités (C9) et les angles d’attitude en temps réel (B9) est notée. En effet, le lacet des positions A à F s’écarte par rapport aux angles de références du patron de lignes définis aux tableaux (3.3 à 3.5), soit -60° d’écart environ tel que constaté pour le 17 mai 2018. En effet, lorsqu’on regarde le comportement des incertitudes en temps réel (POS LV) à la figure de l’annexe B10, on remarque que la dérive est survenue très tôt de telle sorte que toutes les stations statiques du levé sont affectées. L’IMU a vraisemblablement perdu le nord. Comme remarquées pour le 17 mai, les valeurs finales obtenues pour les solutions 1 à 4 sont absurdes, et on remarque que le tangage est beaucoup plus sensible aux erreurs de lacet que le roulis. Il y a une corrélation évidente entre ces deux angles de visée. En faisant le posttraitement, l’incertitude (C10) du lacet est de l’ordre de $2.6'$. Pour la solution 5, on remarque que l’incertitude des valeurs finales obtenues est encore très élevée pour le tangage et le lacet. Les valeurs finales ne sont pas comparables aux résultats des autres levés sauf dans le cas du roulis. Ceci dit, le patron de ligne de 16 stations du 21 août est compromis et les résultats sont écartés. Pour cette date, une seconde antenne avait été utilisée pour aider à déterminer l’azimut de manière plus rapide. En se fiant à l’incertitude du lacet estimée par POS LV (environ 0.2°), l’alignement fin effectué a été insuffisant pour déterminer la vraie direction de l’IMU. On peut noter que

cette partie au début du levé n'a pas été utilisée (SBET), car les données sont de mauvaise qualité. En effet, il y a eu un problème majeur avec la détermination de l'azimut par le mode GAMS, car la longueur minimale de séparation entre les deux antennes était plus courte (0,7 m) que celle par défaut en utilisant le véhicule (1,95 m). En temps réel, les ambiguïtés de l'azimut n'ont pas été résolues et les incertitudes n'étaient pas un bon indicateur de la fidélité de la mesure du lacet (figure 5.6).

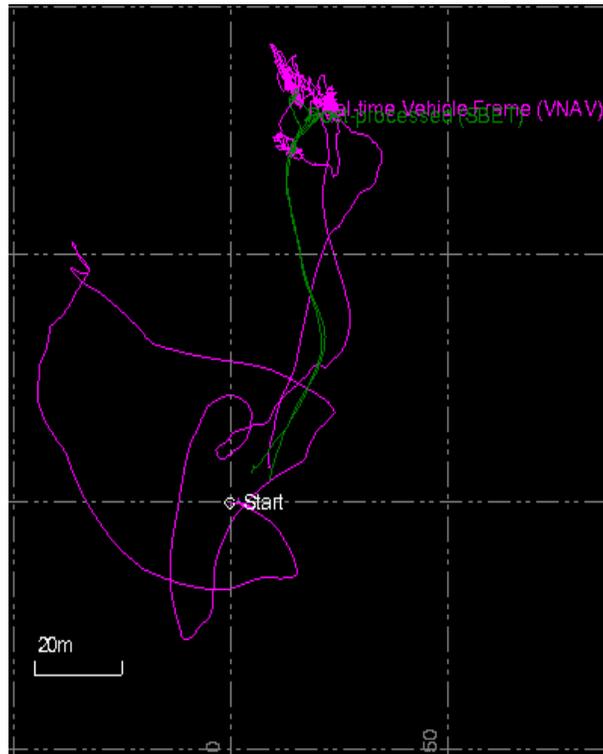


FIGURE 5.6 – Alignement fin de l'IMU du 21-08-2018. Ligne magenta : trajectoire en temps réel; ligne verte : trajectoire posttraitée.

La conservation de l'alignement de l'IMU est une problématique bien réelle qui doit être étudiée davantage. La dérive de l'IMU est bien souvent en cause, car elle survient au même moment. De plus, il ressort de tout cela que l'incertitude en temps réel fournie pour le lacet n'est pas une donnée très fiable et suffisante lorsque le système est opéré en mode SPS. Il serait aussi d'intérêt de faire une comparaison de performances des mesures de l'IMU en opérant le système en mode DGPS et RTK. Les performances de l'IMU, annoncées par le fabricant, pour ces modes sont décrites à l'annexe A1.

Lorsqu'on examine les écarts-types des solutions 1, 4 et 5, on remarque que l'incertitude liée au lacet est plus élevée que pour le roulis, soit 12 fois plus. En effet, ces écarts-types reflètent l'incertitude réelle des valeurs finales déterminées pour ces angles. Par conséquent, ces valeurs

ne sont pas acceptables, car on veut déterminer celles-ci de la manière la plus juste possible avec une incertitude de 0.01° . Cela dit, le patron de ligne de 16 stations du 17 mai et celui 21 août sont compromis et les résultats sont écartés.

Pour le tangage, les valeurs finales obtenues en utilisant un patron de 16 stations (figure 5.7) démontrent que l'estimation n'est pas fiable. Les écarts-types sont acceptables pour les valeurs finales déterminées le 24 mai et le 12 juin, mais la corrélation avec l'angle de lacet semble avoir un impact sur l'incertitude des valeurs lorsqu'on compare avec l'ordre de grandeur des valeurs obtenues avec le patron de lignes de 36 stations (figure 5.8). En somme, le patron de ligne n'est pas adéquat comme plan d'expérience pour l'ajustage des angles de visée d'un SLM par ajustage statique.

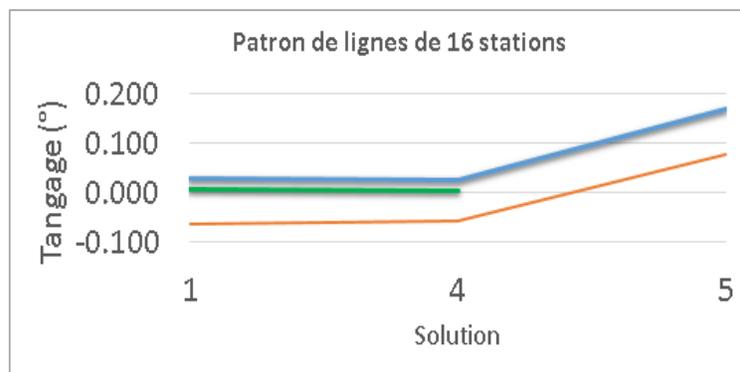


FIGURE 5.7 – Répétabilité du tangage avec 16 stations. Ligne orange, valeurs finales du 17-05-2018 ; ligne bleue, valeurs finales du 24-05-2018 ; et ligne verte, valeurs finales du 12-06-2018.

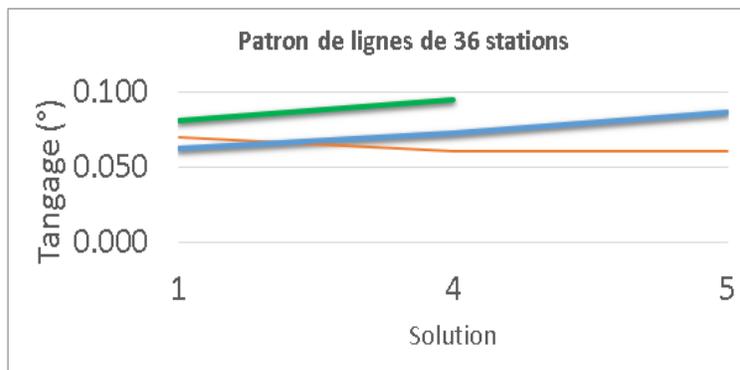


FIGURE 5.8 – Répétabilité du tangage avec 36 stations. Ligne orange, valeurs finales du 12-10-2017 ; ligne bleue, valeurs finales du 17-05-2018 ; et ligne verte, valeurs finales du 12-06-2018.

Patron de ligne de 36 stations

Pour ce patron de lignes, les valeurs déterminées le 21 août sont écartées, car l'ajustement des angles de visée est sensible aux erreurs d'alignement.

Les valeurs finales obtenues pour le roulis sont répétables et fiables pour les différentes dates de levés. Les valeurs finales déterminées pour les trois premières dates de levé sont compatibles vis-à-vis des écarts-types estimés. On remarque que l'incertitude du lacet est environ deux fois moindre que celle du tangage et du roulis. Les valeurs estimées pour le tangage et le lacet varient d'environ $0,04^\circ$ et $0,05^\circ$ respectivement en excluant la solution 4 du 12 juin 2018. La répétabilité des angles d'attitude est plus consistante pour ce patron de lignes, car les valeurs finales des différents levés sont comparables. L'analyse des solutions 1, 4 et 5 permet d'avoir une vue d'ensemble de la fiabilité des valeurs déterminées. La solution 5 demeure biaisée comparée aux autres, car les angles d'attitude sont recalculés et souvent corrigés dans le cas des pertes d'alignements. Cela affecte le lacet et le tangage au second degré. Il est préférable de ne pas utiliser les valeurs déterminées par cette solution. La solution 4 permet d'avoir plus de répétabilité pour le tangage et vient minimiser l'impact du lacet sur celui-ci. En effet dans les 3 premiers levés on constate une variation maximale de 0.03° pour le tangage alors que cela impacte davantage le roulis. La solution 1 demeure stable pour le tangage et le lacet qui sont les deux angles les plus difficiles à estimer. Cette difficulté est liée à la géométrie d'acquisition du système utilisé. En effet, l'axe de lacet et celui du tangage sont alignés, ce qui explique la forte corrélation entre ces deux angles et rend aussi très compliquée l'estimation de l'angle de visée associé au tangage.

5.1.4 Solutions adoptées

Le tableau (5.1) présente les solutions finales qui ont été retenues pour l'ajustage des angles de visée du MX2.

TABLEAU 5.1 – Valeurs finales obtenues par ajustage statique (MX2 single head)

CASAULT 2017-10-12	Roulis ($^\circ$)	Tangage ($^\circ$)	Lacet ($^\circ$)
$\varphi_b, \theta_b, \psi_b$	-0.346	0.070	180.065
σ ($^\circ$)	0.04	0.04	0.07
CASAULT 2018-06-12	Roulis ($^\circ$)	Tangage ($^\circ$)	Lacet ($^\circ$)
$\varphi_b, \theta_b, \psi_b$	-0.300	0.081	180.076
σ ($^\circ$)	0.02	0.02	0.03
CASAULT 2018-05-17	Roulis ($^\circ$)	Tangage ($^\circ$)	Lacet ($^\circ$)
$\varphi_b, \theta_b, \psi_b$	-0.307	0.063	180.101
σ ($^\circ$)	0.02	0.02	0.04

Comme on peut constater sur ce tableau, la méthode proposée fournit une bonne répétabilité

des résultats au travers des différentes séances de collecte. Il est à noter que ces résultats ne tiennent pas compte du biais de portée du scanneur.

5.2 Latence

Pour la latence, les valeurs estimées sont comparables pour les plans S2 et S3. Le gros inconvénient est que l'incertitude associée à la valeur déterminée est plus grande que la valeur estimée. On parle d'une estimation de 50ms alors que l'incertitude rattachée à cette valeur est de 100ms (tableau 4.9). Ceci a été expliqué au chapitre 3 lorsque les limitations de cette méthode ont été présentées. Pour la collecte du 24 mai, la vitesse de balayage du scanneur était de 10Hz lors de l'acquisition. Cette valeur explique l'incertitude liée à la latence estimée. Ce résultat n'est pas acceptable, car, l'IMU fournit une fréquence d'échantillonnage de 5ms pour les observations. La latence du système doit être comparable à cette valeur en pratique.

La principale problématique rencontrée est liée à la sélection des données pour les plages temporelles correspondant aux vitesses. La sélection des vitesses devrait être préalable à celle des données lidar. L'anomalie constatée sur les données est d'une part la redondance des points qui n'est pas suffisante pour mesurer le décalage Dx. D'autre part, les vitesses ne sont pas constantes dans le temps. En effet, on constate des variations entre 0.1 et 0.3 m/s pour les graphiques de l'annexe D2. Cette variation perturbe le résultat, car son ordre de grandeur est équivalent à la différence de vitesse entre deux passages. Cette même difficulté est rencontrée au niveau des traitements de la latence IMU-lidar.

5.3 Biais de portée

Les résultats de comparaison présentés au chapitre précédent mènent à conclure que le scanneur du MX2 est affecté par un biais de mesure dont la valeur semble proportionnelle à la distance mesurée. En effet, les sites 3 et 5 permettent de détecter deux valeurs de justesse différentes associées au même instrument qui sont répétables et comparables. Pour le site 3, on constate une anomalie au niveau des données de la position 2, mais cela s'explique par une anomalie des centroïdes au niveau des deux tours pour les données du MX2. En effet, l'écart maximal transversal est de 27cm pour la tour sud et 13cm pour la tour nord à cette position. Toutefois, les positions 1 et 3 présentent des écarts inférieurs à 3cm (tableau 3.27). Au site 5, on note une bonne répétabilité des écarts au niveau des deux zones d'extraction. Ces résultats permettent de démontrer que le biais de portée du scanneur n'est pas constant en fonction de la distance mesurée. Une courbe d'étalonnage en fonction des résultats de cette expérience pourrait être utilisée pour appliquer une correction. Il serait plus adéquat dans ce cas de s'adresser au fabricant pour modéliser cette erreur systématique.

Par ailleurs, l'analyse des données permet d'étudier la fidélité des données du MX2 par rapport

aux spécifications. La dispersion des points sur le même plan (mur) a été calculée pour chaque position du site 3 et du site 5. Ces résultats sont présentés aux tableaux (5.2 et 5.3).

TABLEAU 5.2 – Fidélité des données du MX2 au site 3

Position	Dispersion moy. (m)
Pn1 – 10m	0.014
Pn2 – 60m	0.012
Pn3 – 45m	0.017

TABLEAU 5.3 – Fidélité des données du MX2 au site 5

Position	Dispersion moy. (m)
Pn – 12m	0.017

Comme on peut le constater, l'incertitude moyenne de mesure du scanneur est plus grande que 1cm telle qu'annoncée par le fabricant. Elle tend plus vers un ordre de grandeur de 2cm. Visuellement, on peut mesurer que l'épaisseur des lignes de scans est d'environ 5 à 7cm (figure 5.9). La dispersion moyenne de la SX10 correspond quant à elle aux spécifications du fabricant.

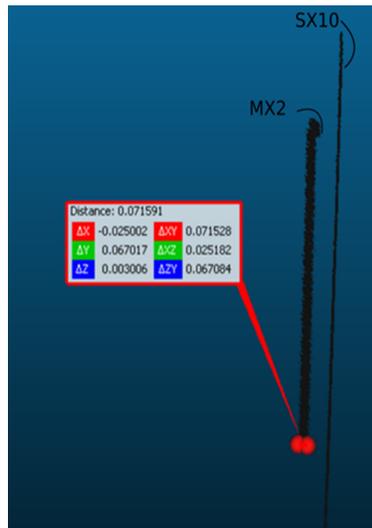


FIGURE 5.9 – Fidélité des mesures de portée du MX2 comparée à celle de la SX10 sur un même plan.

5.4 Validation des résultats

En appliquant les angles de visée déterminés pour le 12 juin, on obtient une diminution des désalignements entre les plans, telle que montrée à la figure (5.10). On note en moyenne une réduction des écarts entre les plans d'un même recouvrement dont l'ordre de grandeur avant lecture est du double de l'ordre de grandeur après lecture. Les valeurs finales déterminées au tableau (5.1) sont classées par ordre de performances. Les résultats du 12 juin sont 9% plus performants que ceux du 17 mai et ceux du 12 octobre sont 5% plus performants que ceux du 12 juin.

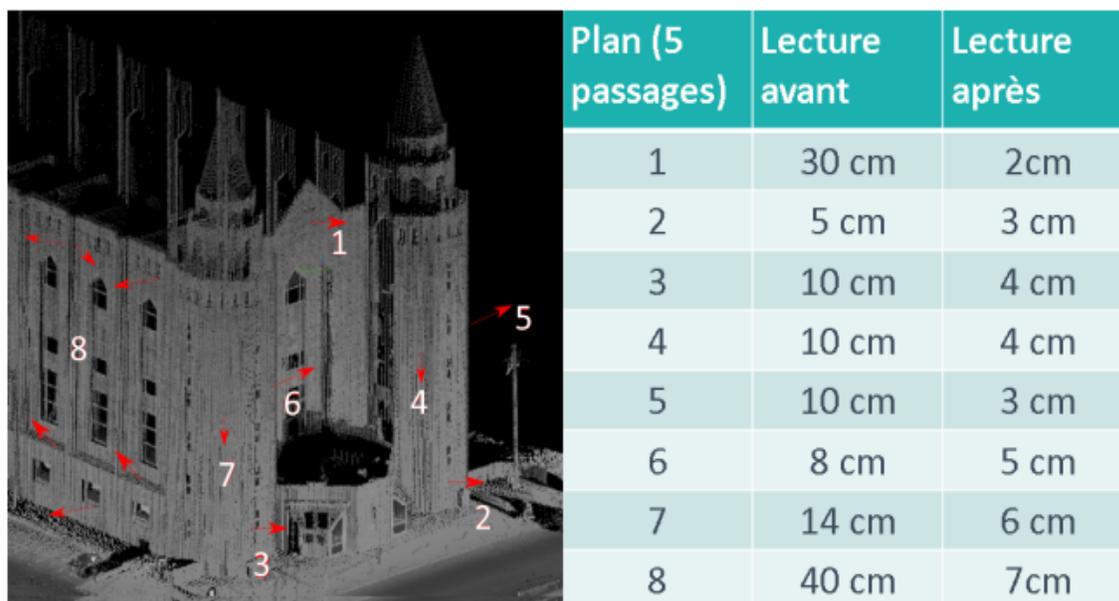


FIGURE 5.10 – Comparaison relative des nuages de points en recouvrement issus de 5 passages : levé MX2 en mode dynamique (Casault).

Une comparaison nuage à nuage des données du MX2 par rapport à celles de la SX10 permet aussi de comparer l'effet des angles de visée avant l'application des valeurs déterminées (figure 5.11) et après l'application des valeurs déterminées (figure 5.12). On voit avant ajustement que l'incertitude réelle des points lidar est plus importante dans les zones rasantes et pour les portées maximales. Ces points sont colorés en rouge. Après ajustement, on note que tous ces points critiques ont subi une bonification importante et la couleur est plus homogène pour l'ensemble du nuage de points. La modélisation des erreurs systématiques liées aux angles de visée est adéquate. Il reste cependant des écarts (environ 5 cm en moyenne) entre les deux nuages qui sont attribuables essentiellement au biais de portée qui n'a pas été pris en compte dans le calcul de cette comparaison, mais aussi aux incertitudes de positionnement entre les deux nuages dont le mode de géoréférencement n'est pas identique.

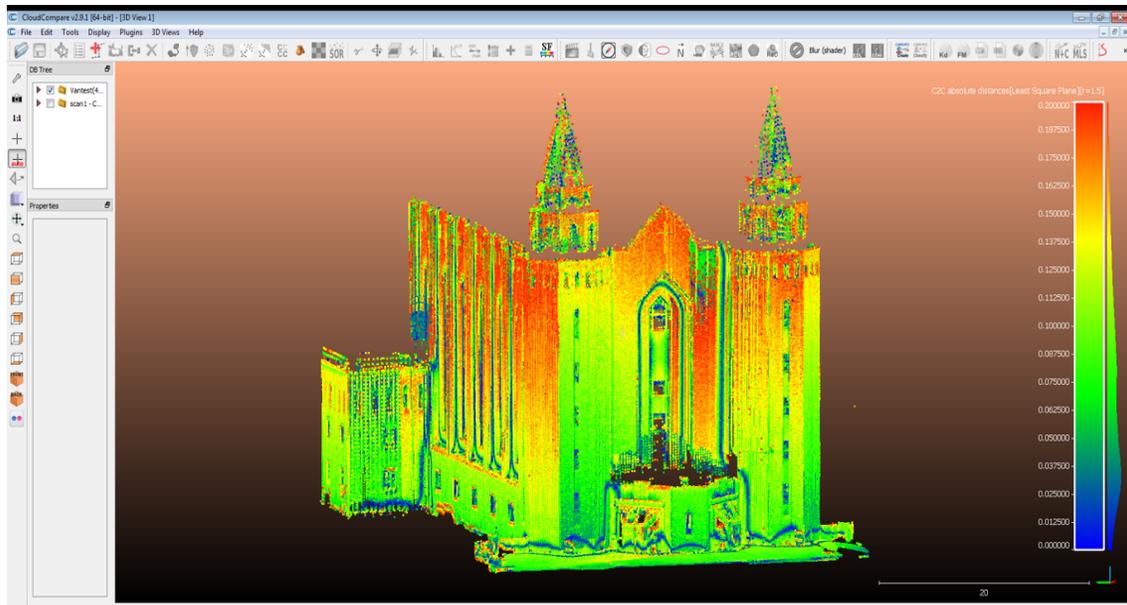


FIGURE 5.11 – Comparaison absolue de deux nuages de points : levé MX2 vs SX10 (Casault : avant l'application des paramètres d'ajustage)

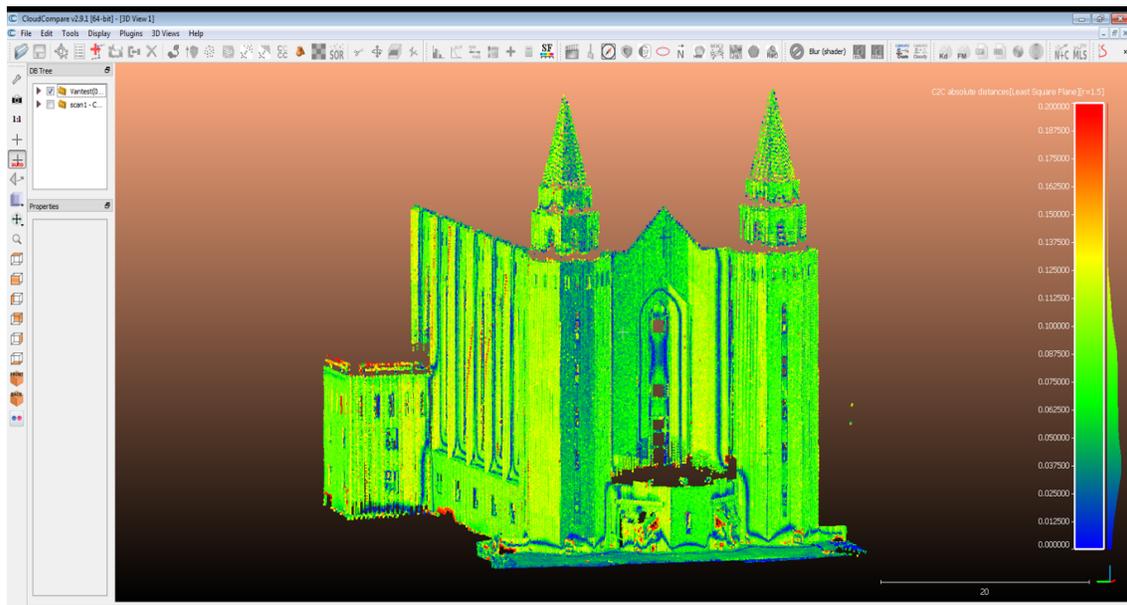


FIGURE 5.12 – Comparaison absolue de deux nuages de points : levé MX2 vs SX10 (Casault : après l'application des paramètres d'ajustage)

Conclusion

Retour sur la méthode d'ajustage des angles de visée d'un SLM en mode statique

Ce projet de recherche consistait à améliorer la performance des systèmes lidar mobiles, commerciaux ou hybrides, en considérant chaque composant (lidar, centrale inertielle, récepteur de position) de façon indépendante. Le premier objectif de ce mémoire était de concevoir une méthode d'ajustage statique la plus juste et fidèle possible qui doit servir de base de comparaison aux autres méthodes d'ajustage en mode dynamique.

On a insisté sur la nécessité de l'ajustage des angles de visée et de la latence (positionnement et/ou attitude avec le lidar) en proposant un plan d'acquisition adapté à un SLM composé d'un scanneur 2D, d'une centrale d'attitude et d'un récepteur avec une antenne GNSS. L'ajustage des angles de visée par une méthode statique sans positionnement, découplée de la latence et des bras de levier a été repris et amélioré, notamment en déterminant un plan d'expérience optimale permettant de maximiser l'information apportée par chaque station à l'équation d'observation. Pour valider ce plan d'expérience, des données acquises à l'aide du SLM Trimble MX2 ont été utilisées. Pour ce faire, des algorithmes ont été développés sous Scilab afin d'étudier les stations statiques optimales pour maximiser l'observabilité des erreurs d'angles de visée. D'autres routines ont été mises en place pour effectuer des opérations courantes de rétro-ingénierie qui sont surtout utiles lorsqu'on est dans une phase d'intégration d'un nouveau SLM. Plusieurs documents de référence qui traitent de l'ajustement des paramètres d'intégration d'un SLM ont été consultés pour mieux inspirer la démarche scientifique dont les grandes lignes se retrouvent dans ce mémoire. Les résultats de la recherche peuvent se résumer par la détermination des angles de visée du SLM MX2 et la validation des performances après ajustage à partir d'un levé réel. Une répétabilité de la méthode d'ajustage a été vérifiée à l'aide de trois collectes de données différentes et une validation du plan d'expérience d'acquisition d'une série d'observations pour l'ajustage statique des angles de visée. Des pistes d'optimisation de l'ajustage sont aussi proposées à la section suivante. Enfin, on note une diminution de l'incertitude des mesures calculée sur les nuages de points acquis par différents passages du SLM sur le même site en appliquant les paramètres d'ajustage estimés sur un

levé réel avec le SLM. Par exemple, les distances orthogonales d'un ensemble de plans visibles sur deux passages sont passées d'environ 30 cm à 5 cm après l'application des paramètres d'ajustage estimés.

Le deuxième objectif consistait à faire la mise au point d'outils de vérification des performances après ajustage du SLM pour valider les paramètres obtenus. De plus, le MX2 a servi à étudier la latence lidar-POS par un scan dynamique de plans inclinés par rapport au mouvement de la plateforme et à l'ajustage des plans. Cela a notamment été rendu possible en exploitant les ressources de POSpac et de Trident. Une des pistes explorées est aussi l'amélioration des méthodes d'estimation de latence, en se passant d'une table 3D précise, et en utilisant l'information de vitesse angulaire de l'IMU. Le cadre théorique entourant l'estimation de ce paramètre a été décortiqué et un moyen pratique d'acquisition a été proposé.

Enfin, une technique permettant d'évaluer la présence d'erreurs de mesure du scanneur a aussi été présentée. Elle se réalise tout simplement en utilisant des données étalons recueillies par un instrument conventionnel d'arpentage. Aujourd'hui l'ajustage des bras de levier occupe moins d'intérêt pratique, car pour les SLMs terrestres, le boîtier d'intégration est une pièce mécanique modélisée avec une grande précision et dont les dimensions sont facilement accessibles à l'aide des plans de dessins techniques. Il s'agit néanmoins d'un aspect important pour les SLMs hybrides (fait maison). Le SLM peut être modélisé produisant un modèle 3D sur lequel il est possible de mesurer les bras de levier.

Recommandations pour la poursuite des travaux

La technique d'ajustage des angles de visée proposée offre un modèle mathématique robuste. Cela se prouve facilement en comparant les résultats obtenus dans des conditions passables, voire extrêmes (utilisation des angles d'attitude en temps réel) vis-à-vis des paramètres obtenus après posttraitement des données de navigation de l'IMU. Elle prend sa place parmi les méthodes d'ajustage rigoureuses. Une méthode d'ajustage rigoureuse correspond à une méthode qui ajuste un ou des paramètres inconnus à partir d'observations qui sont soumises aux variations du même paramètre (Seube, 2018). Il a été démontré au chapitre 3 de ce mémoire que les vecteurs directeurs sont des observations soumises à des rotations angulaires et que les angles de visée sont des erreurs d'orientations qu'on peut observer et caractériser directement à partir d'une série d'observations. Cependant, il est nécessaire de maximiser cette observabilité pour garantir des résultats fidèles et justes en utilisant un ensemble de ressources optimales. Ces ressources sont de deux natures : 1-les stations statiques par rapport au plan qui ont été prises en compte par le plan d'expérience proposé et 2-le nombre de plans utilisés et leur orientation. Les résultats de l'optimisation indiquent que l'utilisation d'un plan incliné améliore nettement l'observabilité des angles de visée. Compte tenu de l'impossibilité de trouver des bâtiments avec des murs inclinés, il serait intéressant de tester la méthode sur des

plans artificiels usinés. À l'origine, Le Scouarnec et al. (2014) proposent un plan d'acquisition basé sur deux surfaces : une horizontale et une verticale. Cela permet en effet de découpler le tangage et le lacet qui comme on l'a vu lors de l'analyse sont des angles très corrélés. La surface horizontale servirait donc à l'observabilité du lacet alors que la surface verticale est utilisée pour le roulis et le tangage. L'usage de deux plans ajoute plus de redondance au système et permet de contrôler les observations.

Deux autres aspects importants de cette méthode de calibrage statique devraient être améliorés. Premièrement, l'acquisition des données lidar mobiles, car les sessions d'enregistrement demandent beaucoup d'efforts et de patience. Actuellement, un nombre minimal de trois personnes est requis pour exécuter la procédure au complet : une personne pour s'occuper de l'enregistrement des données et deux personnes comme aide pour exécuter les stations statiques d'ajustage. Le terme statique est un vrai compromis, car lors de l'acquisition, le système doit être supporté par les aides pour appliquer des valeurs d'attitude. Pour donner une idée, le Trimble MX2 pèse 17kg alors que le montage installé sur une structure en bois ajoute un 5 kg supplémentaire.

Conjointement, il serait nécessaire d'usiner une table tournante rustique qui permet de répéter avec précision des angles de rotation en roulis et en tangage, et ce avec le minimum d'effort possible. Cela permettrait de faire des sessions de scan plus longues en augmentant le nombre de stations statiques produisant des résultats plus performants. Le changement de lacet s'opère par le chariot qui est équipé de roues et cela ne pose pas de problème. La figure (5.13) illustre les efforts fournis par l'équipe de levé qui a participé à l'étape d'acquisition des données. Par conséquent, un travail de mécanisation doit être fait pour l'acquisition des données lidar mobiles nécessaires à l'ajustage statique. De plus, la motorisation du banc de calibrage du laboratoire de métrologie permettrait d'améliorer nettement le test de latence POS-lidar en vitesse linéaire constante avec une trajectoire identique.



FIGURE 5.13 – Procédure fastidieuse d’acquisition pour l’ajustage des angles de visée.

Deuxièmement, une étape importante de l’ajustage de ces angles de visée est liée à l’extraction des lignes de scan qui servent à l’estimation des angles de visée. L’étape d’extraction demande beaucoup de patience et d’attention pour vérifier que les points extraits appartiennent bien à la surface. Cela n’est pas évident, car le mur et le sol ont les mêmes intensités de retour. Il est donc plus facile de les confondre lorsque la ligne de scan est située au bas du mur avec une orientation rasante. L’idée proposée est donc de recourir à une méthode d’extraction automatisée qui est disponible en open source avec la librairie PCL. La méthode RANSAC par exemple propose un ajustement robuste en considérant que le nuage de points contient des observations qui correspondent au modèle géométrique ciblé et des observations (en portion plus réduite) qui n’appartiennent pas à ce modèle. Le modèle mathématique publié par Fischler et Bolles, 1981 est disponible sur PCL dans le langage C++. La figure (5.14) illustre la procédure. Par conséquent, un travail d’automatisation doit être fait. En moyenne, un temps de 3h était nécessaire pour extraire et nettoyer 52 stations d’ajustage.

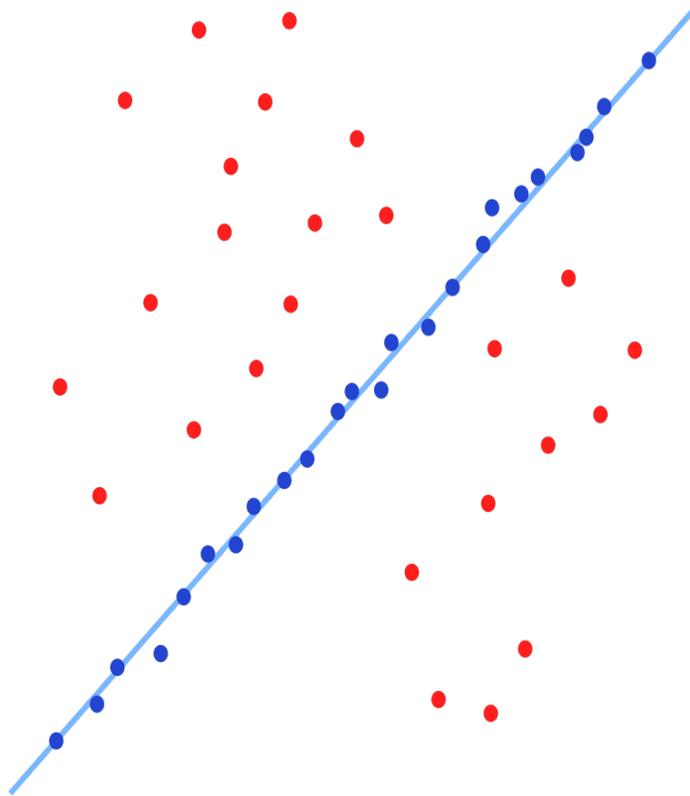


FIGURE 5.14 – Méthode d’ajustement et d’extraction d’une ligne avec l’algorithme RANSAC.

D’autres méthodes comme les Quadtree, Region Growing et Hough Transform sont aussi envisageables. Ces méthodes consistent à effectuer une subdivision spatiale récursive du nuage de points afin de détecter les sous-ensembles du nuage de points contenant une primitive géométrique.

Toujours dans ce sens, l’extraction des données pour estimer la latence est problématique du côté de Trident. En effet, il est impossible de sélectionner les points soumis à la fois à des vitesses (angulaires et/ou linéaires) constantes et à des accélérations maximales. Cela a constitué un grand inconvénient lors de l’estimation de la latence. Par conséquent, une méthode de sélection inverse est nécessaire.

Bibliographie

- Barber, D., Mills, J., and Smith-Voysey, S. (2008). Geometric validation of a ground-based mobile laser scanning system. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 63(1) :128–141.
- Burman, H. (2000). Laser strip adjustment for data calibration and verification. page 6.
- Cassol, W. N. (2018). Mémoire de recherche : Définition d’un modèle d’incertitude-type composée pour les Systèmes LiDAR Mobiles, Université Laval, Québec, QC, Canada. 108 p.
- Chan, T. O., Lichti, D. D., and Glennie, C. L. (2013). Multi-feature based boresight self-calibration of a terrestrial mobile mapping system. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 82 :112–124.
- Cocard, M. (2017). *Compensation GMT2001 Notes de cours Version 2017*.
- Ellum, C. and El-Sheimy, N. (2002). Land-Based Integrated Systems for Mapping and Gis Applications. *Surv. Rev.*, 36(283) :323–339.
- Europe, L. (2017). Trimble SX10 Scanning total station.
- Filin, S. (2003). Recovery of Systematic Biases in Laser Altimetry Data Using Natural Surfaces. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 69(11) :1235–1242.
- Filin, S. and Vosselman, G. (2004). Adjustment of Airborne Laser Altimetry Strips. *ISPRS Congr. Istanbul, Proc. Comm. III*, 72(10) :1–13.
- Fischler, M. a. and Bolles, R. C. (1981). Paradigm for Model. *Commun. ACM*, 24(6) :381–395.
- Friess, P. (2006). Toward a rigorous methodology for airborne laser mapping. *Proc. EuroCOW*, pages 25–27.
- Gao, C. and Spletzer, J. R. (2010). On-line calibration of multiple LIDARs on a mobile vehicle platform. *Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pages 279–284.
- Goulette, F. (2009). Relevés laser urbains par Systèmes Mobiles de Cartographie. *XYZ, Rev. l’Association Française Topogr.*, (119) :21–25.

- Graefe, G. (2007). Quality management in kinematic laser scanning applications. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 36(5/C55) :6.
- Graefe, G., Caspary, W., Heister, H., Klemm, J., and Sever, M. (2001). The road data acquisition system MoSES—determination and accuracy of trajectory data gained with the Applanix POS/LV. *Proceedings, Third Int. Mob. Mapp. Symp. Cairo, Egypt, January*, pages 3–5.
- Hassan, E. (2014). UCGE Reports Calibration of Multi-Sensor Laser Scanning Systems. (20394).
- He, M., Zhao, H., Davoine, F., Cui, J., and Zha, H. (2013). Pairwise LIDAR calibration using multi-type 3D geometric features in natural scene. *IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, 56(1) :1828–1835.
- Hebel, M. and Stilla, U. (2012). Simultaneous calibration of ALS systems and alignment of multiview LiDAR scans of urban areas. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 50(6) :2364–2379.
- Heinz, E., Eling, C., Wieland, M., Klingbeil, L., and Kuhlmann, H. (2016). Development of a Portable Mobile Laser Scanning System with Special Focus on the System Calibration and Evaluation. (October).
- Heinz, E., Mettenleiter, M., Kuhlmann, H., and Holst, C. (2018). Strategy for Determining the Stochastic Distance Characteristics of the 2D Laser Scanner Z + F Profiler 9012A with Special Focus on the Close Range. *Sensors*, 18(7) :2253.
- Hughes Clarke, J. (2003). Dynamic motion residuals in swath sonar data : Ironing out the creases. *Int. Hydrogr. Rev.*, 4(1) :6–23.
- Joint Committee For Guides In Metrology (2012). Vocabulaire international de métrologie. *VIM3 Int. Vocab. Metrol.*, 3(third) :104.
- Joinville, O. D., Saur, S., and Bretar, F. (2003). B . 3 Le levé laser aéroporté : techniques , applications et recherche Fonctionnement et applications. *Notes de cours*, 74 :37–52.
- Keller, F. and Sternberg, H. (2013). Multi-sensor platform for indoor mobile mapping : System calibration and using a total station for indoor applications. *Remote Sens.*, 5(11) :5805–5824.
- Keyetieu, R., Seube, N., Djine, V., Roue, G., Clement, B., and Bossier, P. (2018). Multi-Beam Echo Sounders—INS Automatic Latency Calibration. *Mar. Geod.*, 41(5) :477–493.
- Kumari, P., Carter, W. E., and Shrestha, R. L. (2011). Adjustment of systematic errors in ALS data through surface matching. *Adv. Sp. Res.*, 47(10) :1851–1864.

- Landry, M. (2017). Mémoire de recherche : Développement d'une nouvelle méthode de calibrage des Systèmes LiDAR Mobiles (SLMs) en laboratoire, Université Laval, Québec, QC, Canada. 167 p. page 167.
- Larouche, C. (2012). Boresight Calibration of Laser Sensors Workflow. *Anal. Trident*.
- Larouche, C. (2015). Amélioration des performances des systèmes lidar mobiles (SLM) « . *GÉOMATIQUE*, pages 8–12.
- Larouche, C., Landry, M., Hassanzadeh Shahraji, M., Ndir, P. M., and Cassol, W. N. (2018). Avancées réalisées en lidar mobile à l ' Université Laval. pages 7–11.
- Le Scouarnec, R., Touzé, T., Lacambre, J. B., and Seube, N. (2013). A positioning free calibration method for mobile laser scanning applications. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 2(5W2) :157–162.
- Le Scouarnec, R., Touzé, T., Lacambre, J. B., and Seube, N. (2014). a New Reliable Boresight Calibration Method for Mobile Laser Scanning Applications. *ISPRS - Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, XL-3/W1(3W1) :67–72.
- Legat, K., Avt, V., and Messflug, T. (2006). Reliability of direct georeferencing : A case study on practical problems and solutions : Final Report on Phase 2 EuroSDR-Project Commission 1 “ Sensors , Primary Data Acquisition and Georeferencing ” “ Reliability of Direct Georeferencing : A Case Study . (June 2015).
- Legris, M., Bretagne, E., France, B., and Responsable, E. B. (2017). Synthèse bibliographique sur les méthodes d 'ajustage automatiques 3D pour les sondeurs multifaisceaux , avec application aux porteurs de surface et aux véhicules sous-marins autonomes.
- Leslar, M. (2016). Improvement of the geospatial accuracy of mobile terrestrial lidar data. (November).
- Leslar, M., Hu, B., and Wang, J. G. (2016). Boresight and lever arm calibration of a mobile terrestrial lidar system. *Geomatica*, 70(2) :97–112.
- Miller, M. and Habib, A. (2016). Comparative analysis of different lidar system calibration techniques. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.*, 2016-Janua(July) :229–235.
- Moniot, R. K. (2009). Deming least-squares fit to multiple hyperplanes. *Appl. Numer. Math.*, 59(1) :135–150.
- Morin, K. and El-Sheimy, N. (2002). Post-mission adjustment methods of airborne laser scanning data. *FIG XXII Int. Congr. Washington, DC USA*, pages 1–12.

- Passaro, V. M., Cuccovillo, A., Vaiani, L., De Carlo, M., and Campanella, C. E. (2017). Gyroscope technology and applications : A review in the industrial perspective. *Sensors (Switzerland)*, 17(10).
- Petrie, G. (2013). Current developments in airborne laser scan - Progress is Being Made! *GEO Informatics*, (December) :16–22.
- Picard, A. and Seube, N. (2012). Estimation of Synchronization Errors of Kinematic Mapping Systems. *Cidco.Ca*.
- Prasad, D. K., Quek, C., Leung, M. K., and Cho, S. Y. (2011). A parameter independent line fitting method. *1st Asian Conf. Pattern Recognition, ACPR 2011*, (2) :441–445.
- Procházková, J. and Martišek, D. (2018). Notes on Iterative Closest Point Algorithm. *Aplimat, ResearchGa*(April) :10.
- Puente, I., González-Jorge, H., Martínez-Sánchez, J., and Arias, P. (2013). Review of mobile mapping and surveying technologies.
- Rieger, P., Studnicka, N., and Pfennigbauer, M. (2008). Boresight Alignment Method for Mobile Laser Scanning Systems. *Proc. RSPRS Conf.*
- Rieger, P., Studnicka, N., Pfennigbauer, M., and Ullrich, A. (2010). Advances in Mobile Laser Scanning Data Acquisition. *Facing Challenges - Build. Capacit.*, (April 2010) :11–16.
- Sands, R. (2017). OxTS Boresight Alignment Determination with Velodyne VLP-16 LiDAR (AE021). (*in Collab. with B. Leslie*), pages 1–7.
- Schenk, T., Seo, S., Csatho, B., and Scatho, B. (2001). Accuracy study of airborne laser scanning data with photogrammetry. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sensing, Vol. XXXIV-3/W4*, XXXIV :113–118.
- Seube, N. (2015). Inertial Navigation and Optimal Estimation. Technical report, CIDCO.
- Seube, N. (2016). Mobile LiDAR performance analysis from overlapping data on natural surfaces. *PSR-SIIRI-953 Proj.*, 13 :66–76.
- Seube, N. and Keyetieu, R. (2017). Multibeam Echo Sounders-IMU Automatic Boresight Calibration on Natural Surfaces Multibeam Echo Sounders-IMU Automatic Boresight Calibration. *Mar. Geod.*, 0(0) :1–15.
- Seube, N., Picard, A., and Rondeau, M. (2012). A simple method to recover the latency time of tactical grade IMU systems. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 74 :85–89.
- Skaloud, J. (2006). EuroSDR-Project Commission 1 “ Sensors , Primary Data Acquisition and Georeferencing ”. pages 1–27.

- Skaloud, J. and Lichti, D. (2006). Rigorous approach to bore-sight self-calibration in airborne laser scanning. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 61(1) :47–59.
- Skaloud, J. and Schaer, P. (2007). Towards Automated Lidar Boresight Self-Calibration. *5th Int. Symp. Mob. Mapp. Technol.*
- Station, S. T. (2016). Trimble SX10. *Trimble community*.
- Touze, T. and Seube, N. (2013). Course module 2 . 7 Geodesy and Least squares Least square estimation.
- Trimble (2013a). Trimble AP20 GNSS-inertial OEM system. pages 1–2.
- Trimble (2013b). Trimble Mx2 Mobile Spatial Imaging system, Versatile mobile mapping for geospatial surveys. *Trimble Mx2 Broch.*
- Vaughn, C. R., Button, J. L., Krabill, W. B., and Rabine, D. (1996). Georeferencing of airborne laser altimeter measurements. *Int. J. Remote Sens.*, 17(11) :2185–2200.
- Vosselman, G. and Maas, H. (2001). Adjustment and filtering of raw laser altimetry data. *Proc. OEEPE Work. Airborne Laserscanning Interferom. SAR Detail. Digit. Elev. Model.*, pages 62–72.
- Vosselman, G. and Maas, H.-G. (2010). *Airborne and terrestrial laser scanning*, volume 4.
- Wang, Z., Shu, R., Xu, W., Pu, H., and Yao, B. (2008). Analysis and Recovery of Systematic Errors in Airborne Laser System. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, XXXVII-B1(Commission VI) :1–6.

Annexe A

Trimble MX2

Cette annexe présente les informations complémentaires mentionnées dans ce mémoire.

A.1 Performances POS LV en mode RTK et DGPS

POS LV		Performance with GNSS				Performance after 60s GNSS Outage			
		X,Y Position (m)	Z Position (m)	Roll and Pitch (°)	True Heading (°)	X,Y Position (m)	Z Position (m)	Roll and Pitch (°)	True Heading (°)
210	PP	0.02	0.05	0.02	0.05	0.32	0.13	0.06	0.06
210	IARTK	0.035	0.05	0.02	0.1	1.27	0.35	0.06	0.1
210	DGPS	0.3	0.5	0.02	0.2	2.51	0.61	0.06	0.2
220	PP	0.02	0.05	0.02	0.025	0.24	0.13	0.06	0.03
220	IARTK	0.035	0.05	0.02	0.05	0.69	0.35	0.06	0.07
220	DGPS	0.3	0.5	0.02	0.05	0.88	0.61	0.06	0.07
420	PP	0.02	0.05	0.015	0.02	0.12	0.1	0.02	0.02
420	IARTK	0.035	0.05	0.015	0.02	0.34	0.27	0.02	0.03
420	DGPS	0.3	0.5	0.015	0.02	0.45	0.56	0.02	0.03
510/520	PP	0.02	0.05	0.005	0.015	0.1	0.07	0.005	0.015
510/520	IARTK	0.035	0.05	0.008	0.02	0.3	0.1	0.008	0.02
510/520	DGPS	0.3	0.5	0.008	0.02	0.42	0.53	0.008	0.02
610/620	PP	0.02	0.05	0.005	0.015	0.1	0.07	0.005	0.015
610/620	IARTK	0.035	0.05	0.005	0.02	0.28	0.1	0.005	0.02
610/620	DGPS	0.3	0.5	0.005	0.02	0.41	0.51	0.005	0.02

FIGURE A.1 – POS LV Applanix 2018

A.2 Dessin technique du MX2 single head annoté

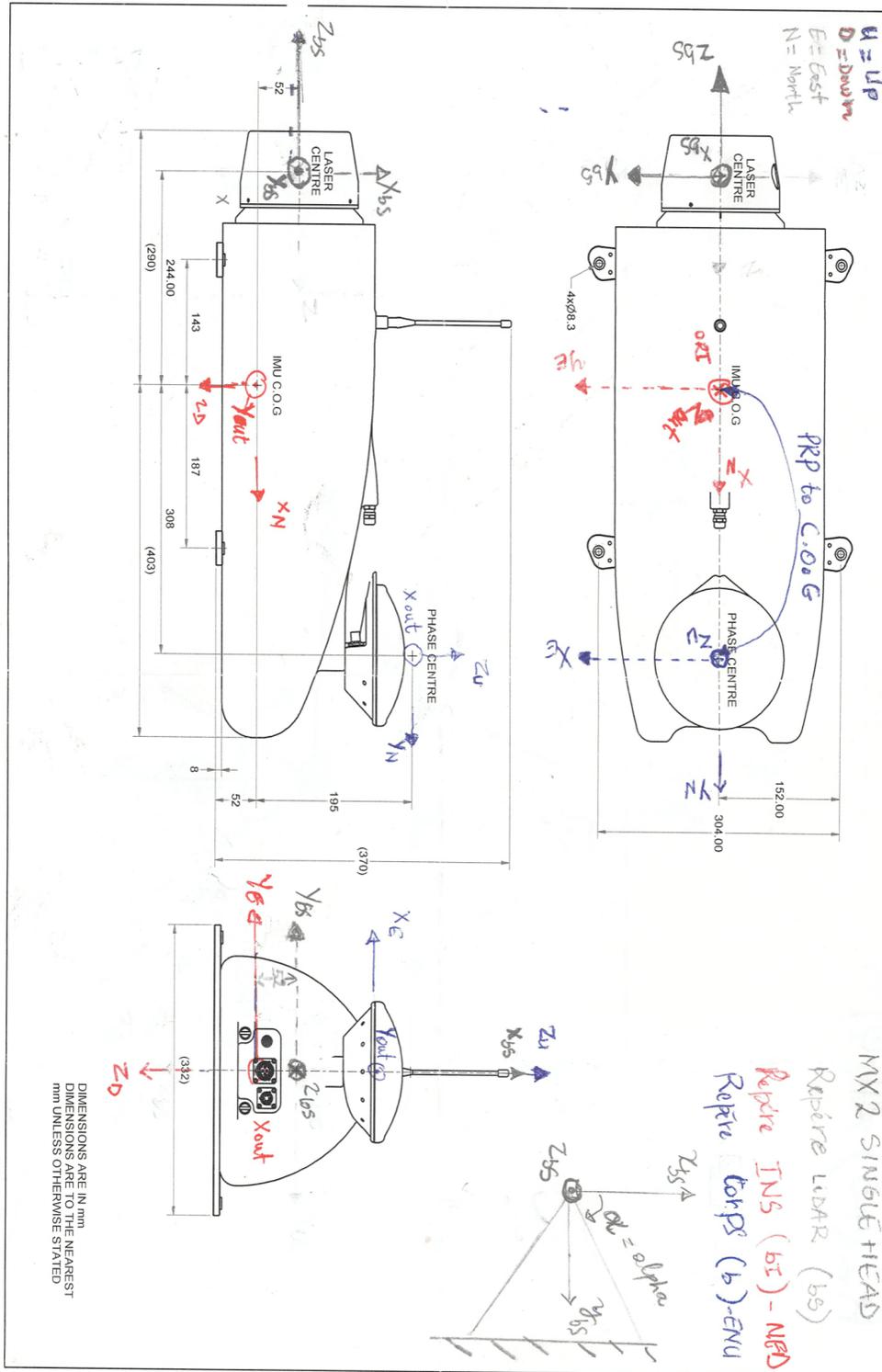


FIGURE A.2 – Repères du MX2 single head

Annexe B

Angles d'attitude en temps réel pour l'ajustage des angles de visée (POS LV)

Cette annexe présente les observations brutes de la matrice de cosinus directeur C_{bI}^n qui ont été utilisées pour l'ajustement des angles de visée.

B.1 Angles d'attitude pour les stations statiques (36) en mode SPS : 12 10 2017

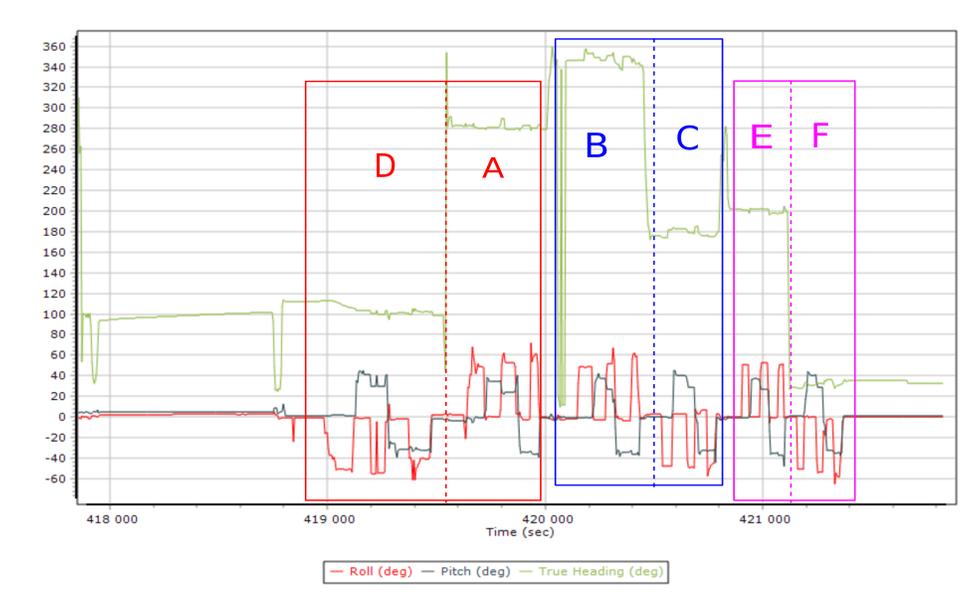


FIGURE B.1 – Angles de navigation $\phi\theta\psi$: 12 10 2017

B.2 Performances POS LV 220 en mode SPS : 12 10 2017

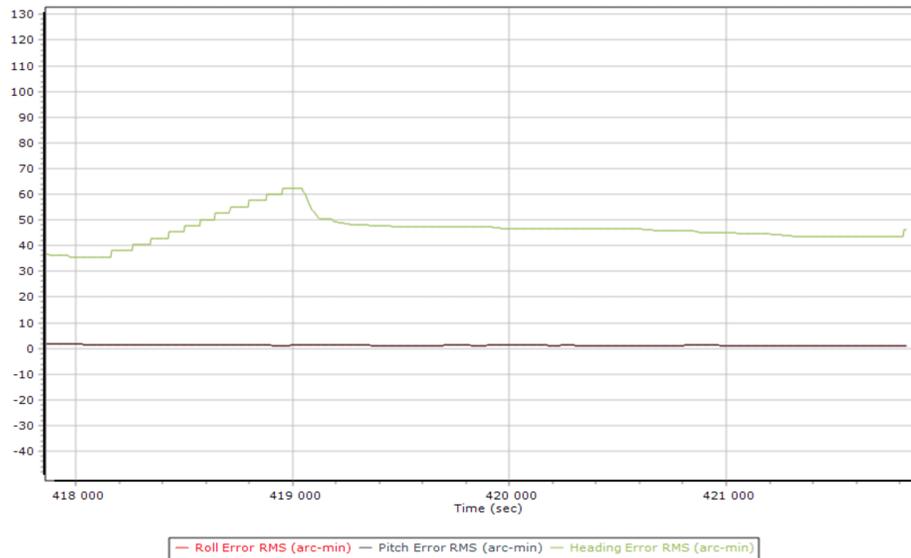


FIGURE B.2 – Incertitudes en RMS des angles de navigation $\phi\theta\psi$: 12 10 2017

B.3 Angles d'attitude pour les stations statiques (36 + 16) en mode SPS : 17 05 2018

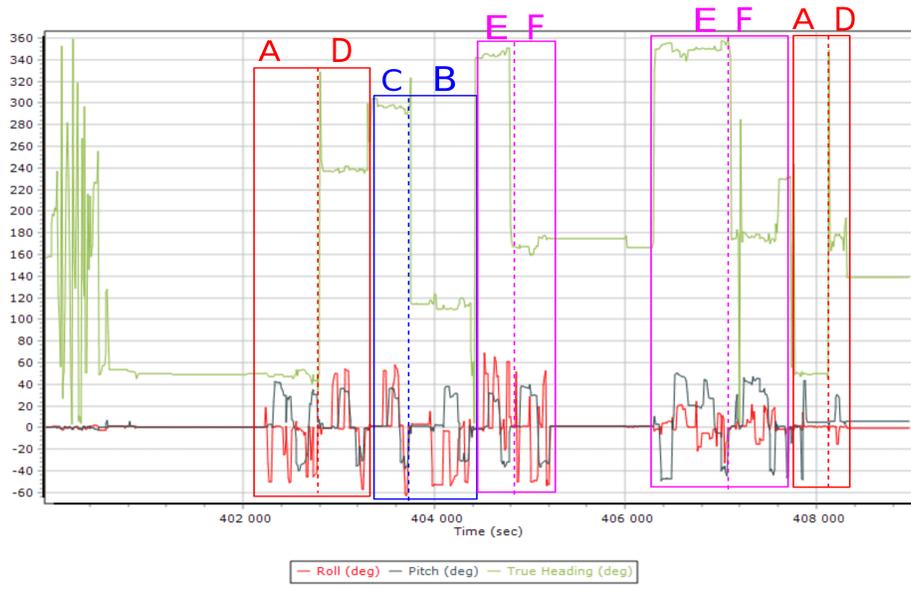


FIGURE B.3 – Angles de navigation $\phi\theta\psi$: 17 05 2018

B.4 Performances POS LV 220 en mode SPS : 17 05 2018

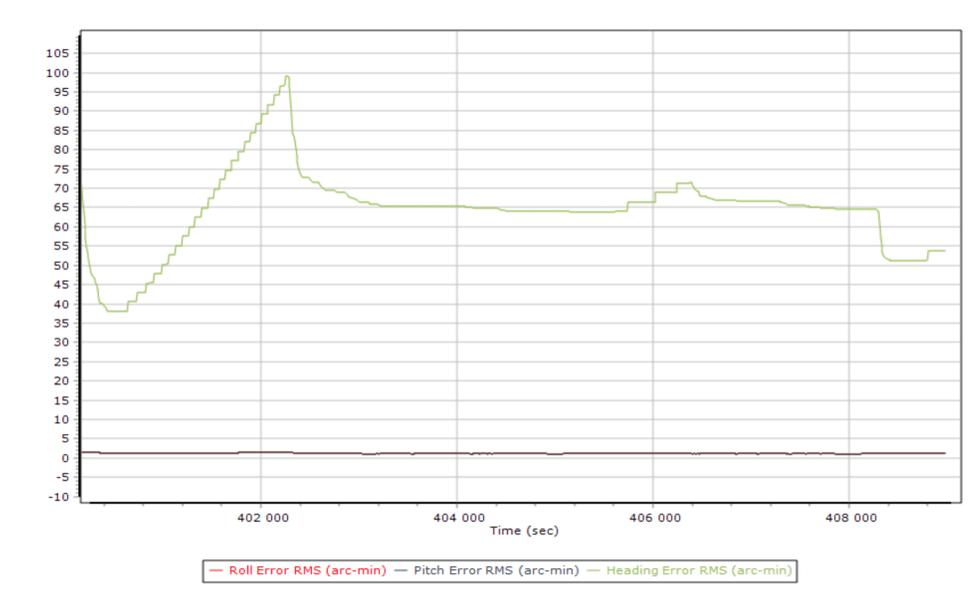


FIGURE B.4 – Incertitudes en RMS des angles de navigation $\phi\theta\psi$: 17 05 2018

B.5 Angles d'attitude pour les stations statiques (16) en mode SPS : 24 05 2018

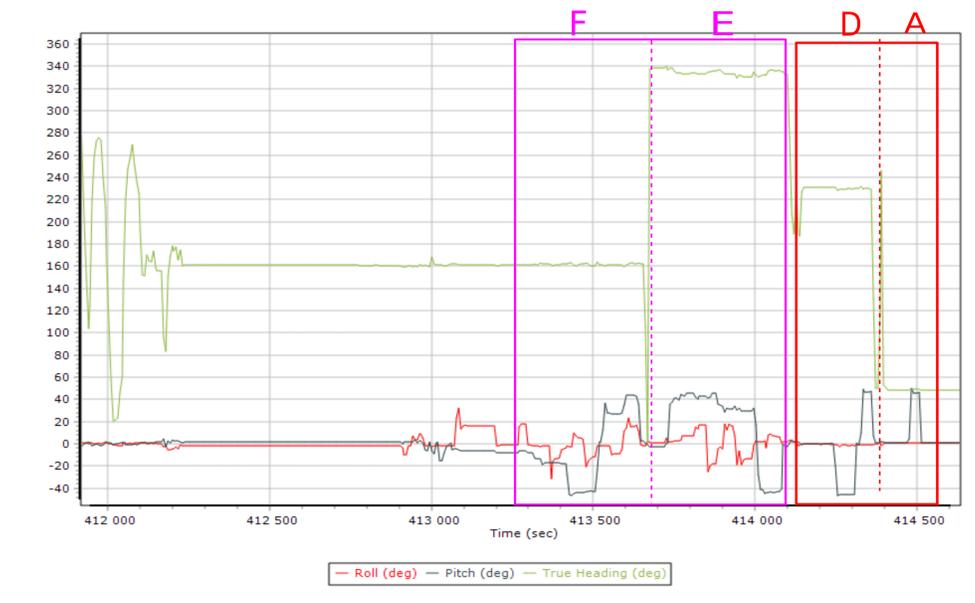


FIGURE B.5 – Angles de navigation $\phi\theta\psi$: 24 05 2018

B.6 Performances POS LV 220 en mode SPS : 24 05 2018

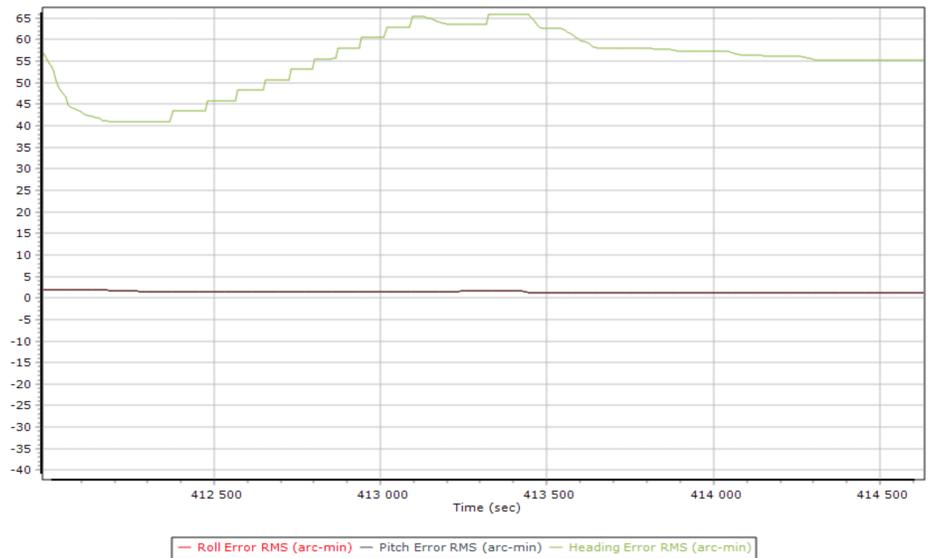


FIGURE B.6 – Incertitudes en RMS des angles de navigation $\phi\theta\psi$: 24 05 2018

B.7 Angles d'attitude pour les stations statiques (36 + 16) en mode SPS : 12 06 2018

Le fichier POS contenant les données brutes est corrompu. Par conséquent, celles enregistrées par Trident Capture ont été tracés.

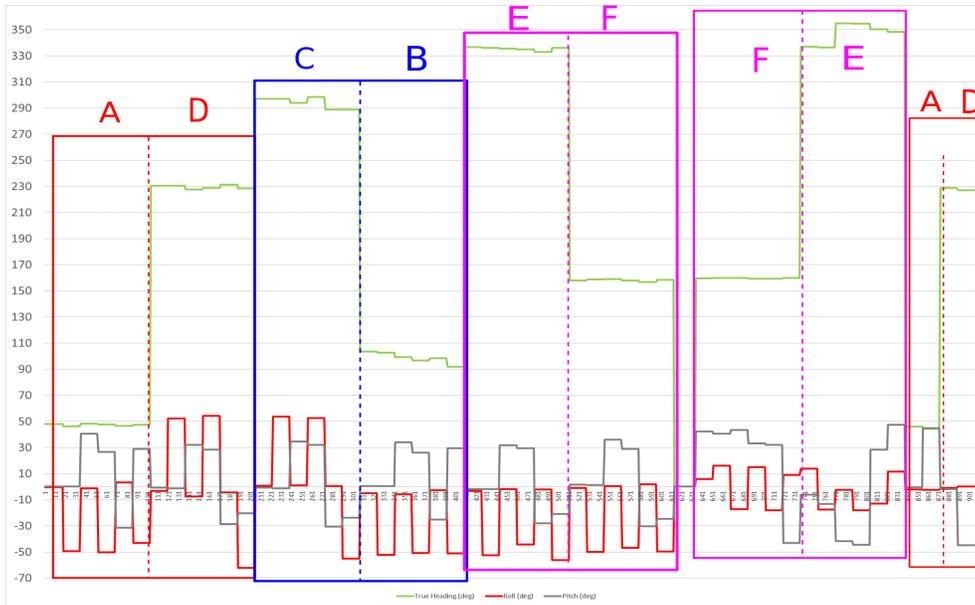


FIGURE B.7 – Angles de navigation $\phi\theta\psi$: 12 06 2018

B.8 Performances POS LV 220 en mode SPS : 12 06 2018

Les performances fournies par Trident Capture ont été tracés.

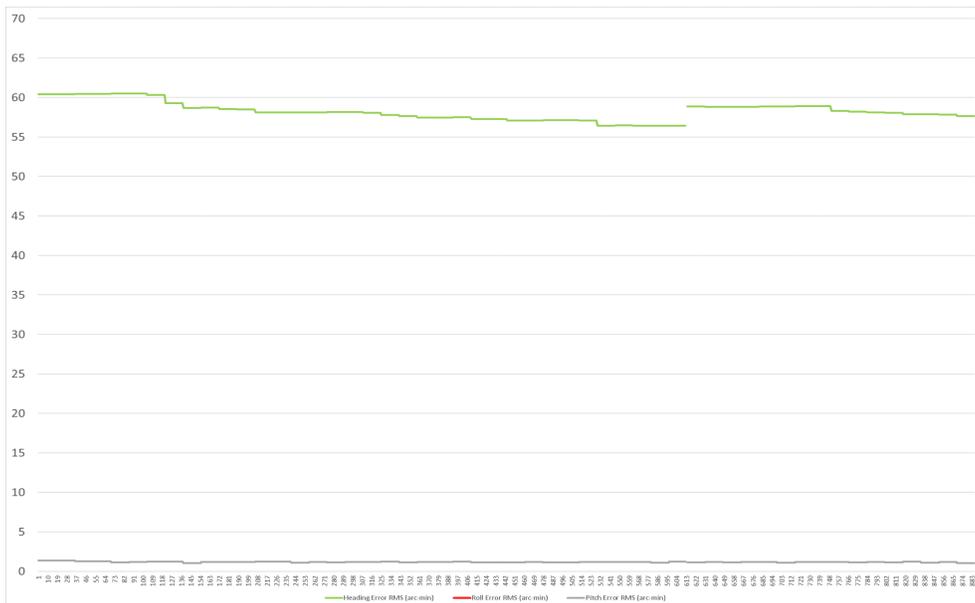


FIGURE B.8 – Incertitudes en RMS des angles de navigation $\phi\theta\psi$: 12 06 2018

B.9 Angles d'attitude pour les stations statiques (36 + 16) en mode SPS : 21 08 2018*

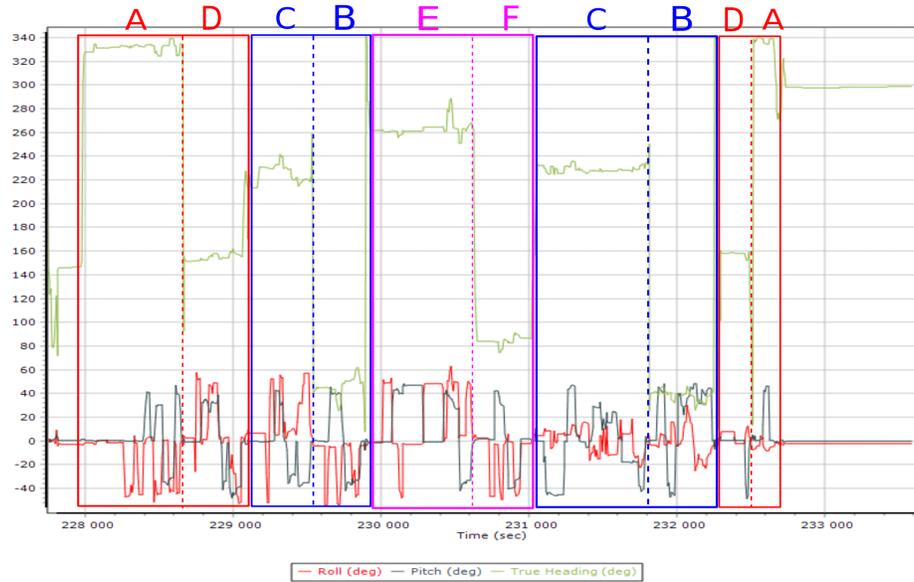


FIGURE B.9 – Angles de navigation $\phi\theta\psi$: 21 08 2018. * Levé avec 2 antenne GNSS (GAMS)

B.10 Performances POS LV 220 en mode SPS : 21 08 2018*

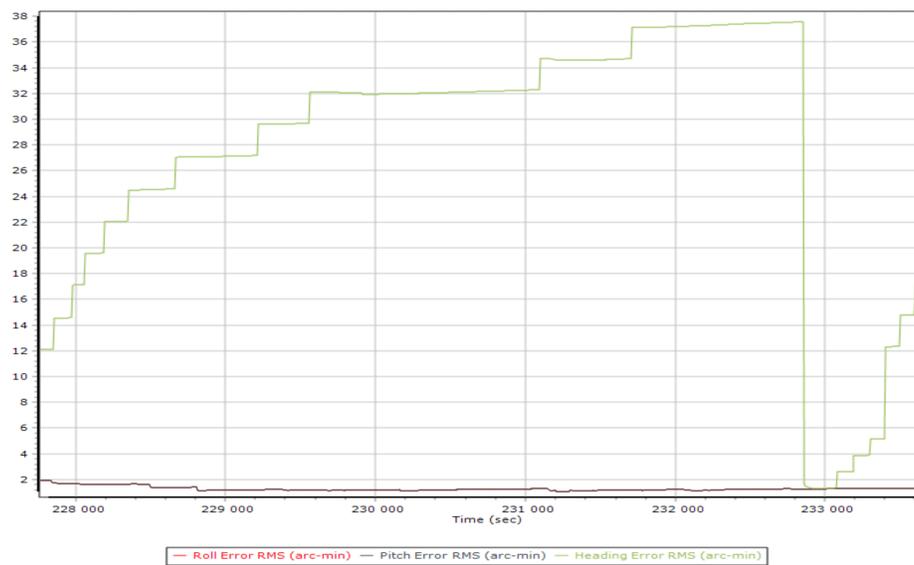


FIGURE B.10 – Incertitudes en RMS des angles de navigation $\phi\theta\psi$: 21 08 2018

Annexe C

Angles d'attitude posttraités pour l'ajustage des angles de visée (POSPac)

Cette annexe présente les observations posttraitées de la matrice de cosinus directeur C_{bI}^m qui ont été utilisées pour comparer les résultats obtenus avec l'utilisation des observations brutes.

C.1 Angles d'attitude pour les stations statiques (36) en mode PPK : 12 10 2017

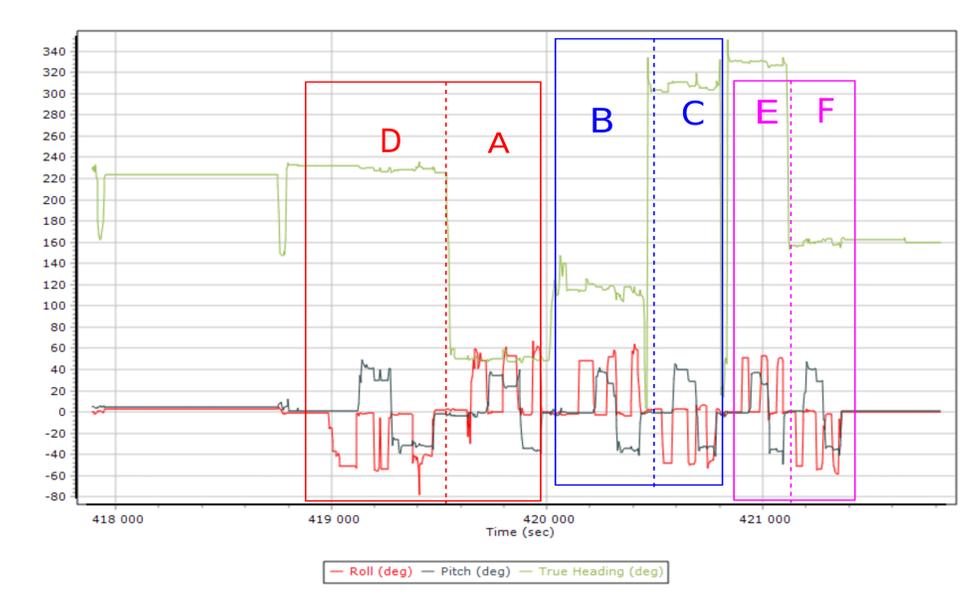


FIGURE C.1 – Angles de navigation $\phi\theta\psi$: 12 10 2017

C.2 Performances POS LV 220 en mode PPK : 12 10 2017

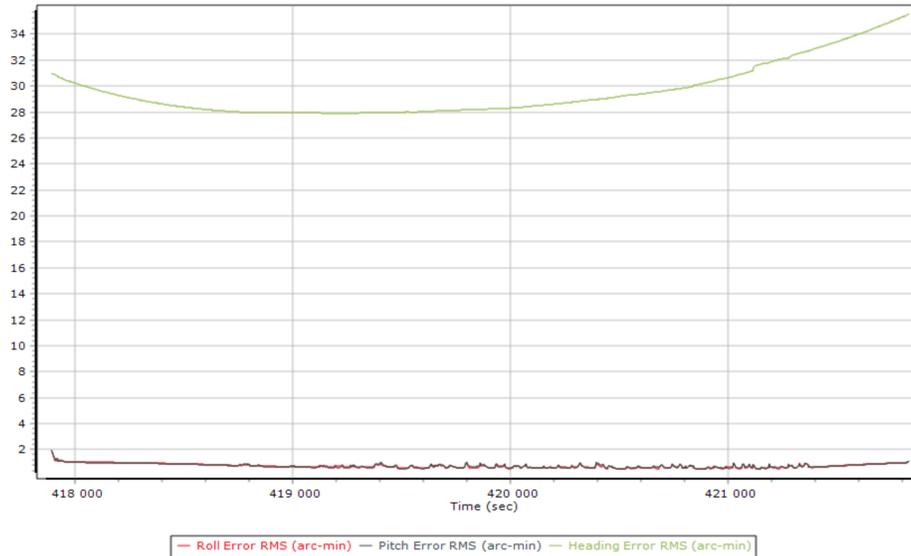


FIGURE C.2 – Incertitudes en RMS des angles de navigation $\phi\theta\psi$: 12 10 2017

C.3 Angles d'attitude pour les stations statiques (36 + 16) en mode PPK : 17 05 2018

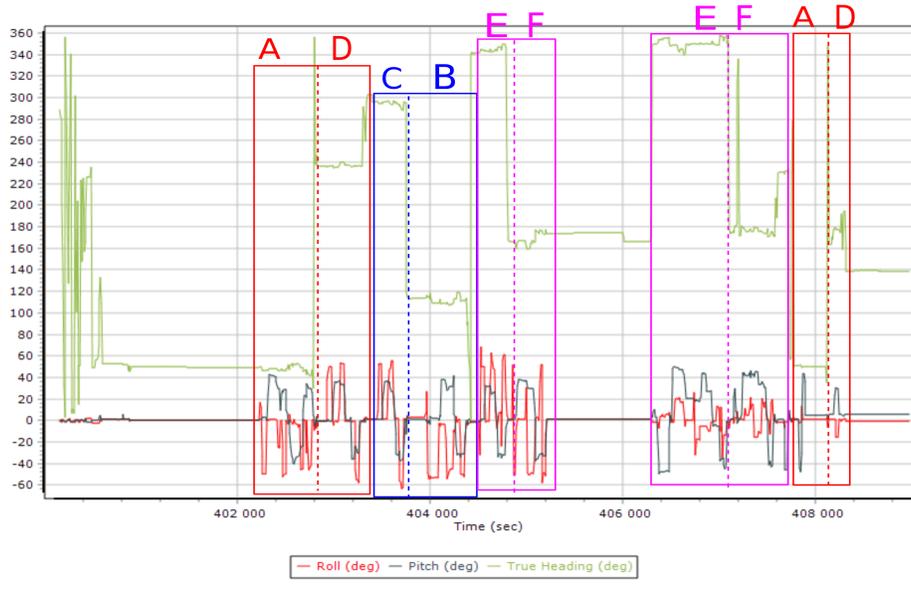


FIGURE C.3 – Angles de navigation $\phi\theta\psi$: 17 05 2018

C.4 Performances POS LV 220 en mode PPK : 17 05 2018

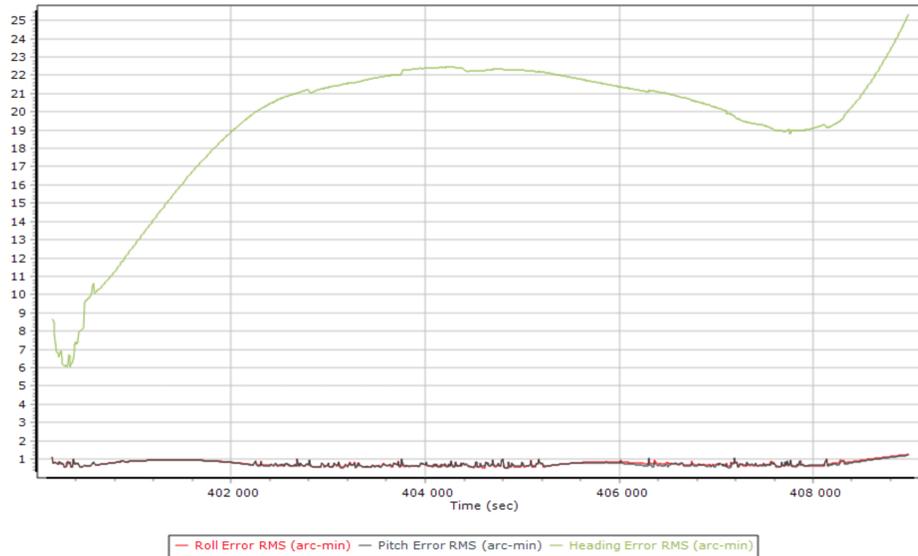


FIGURE C.4 – Incertitudes en RMS des angles de navigation $\phi\theta\psi$: 17 05 2018

C.5 Angles d'attitude pour les stations statiques (16) en mode PPK : 24 05 2018

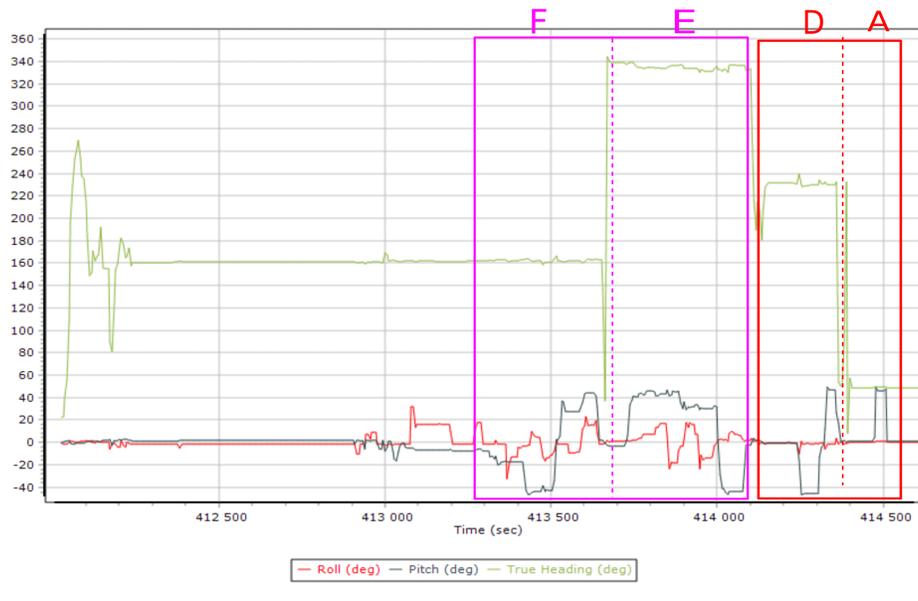


FIGURE C.5 – Angles de navigation $\phi\theta\psi$: 24 05 2018

C.6 Performances POS LV 220 en mode PPK : 24 05 2018

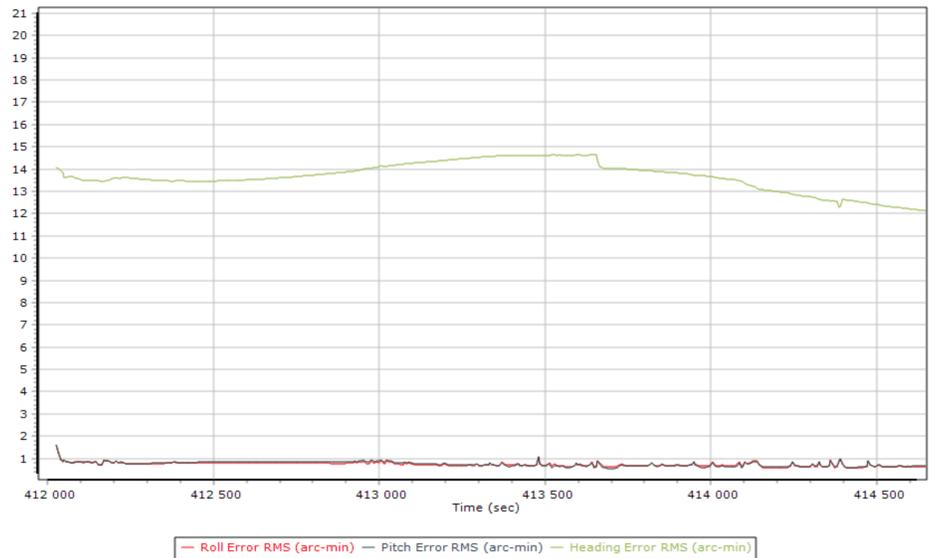


FIGURE C.6 – Incertitudes en RMS des angles de navigation $\phi\theta\psi$: 24 05 2018

C.7 Angles d'attitude pour les stations statiques (36 + 16) en mode PPK : 12 06 2018

Le fichier POS contenant les données brutes est corrompu. Par conséquent, aucun posttraitement n'a été effectué.

C.8 Performances POS LV 220 en mode PPK : 12 06 2018

Aucune incertitude provenant des données posttraitées n'est disponible.

C.9 Angles d'attitude pour les stations statiques (36 + 16) en mode PPK : 21 08 2018*

* Levé avec 2 antenne GNSS (GAMS)

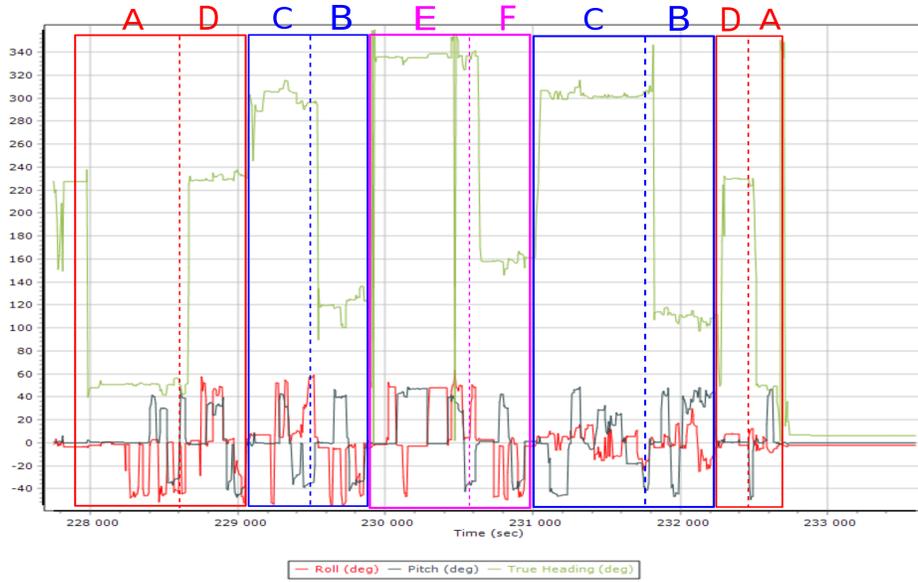


FIGURE C.7 – Angles de navigation $\phi\theta\psi$: 21 08 2018. * Levé avec 2 antenne GNSS (GAMS)

C.10 Performances POS LV 220 en mode PPK : 21 08 2018*

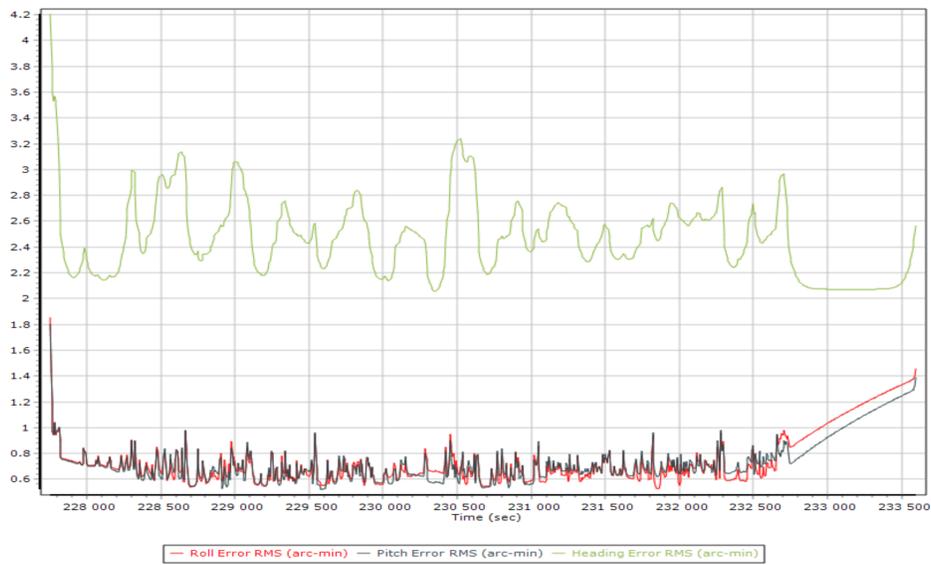


FIGURE C.8 – Incertitudes en RMS des angles de navigation $\phi\theta\psi$: 21 08 2018

Annexe D

Traitements

D.1 Routines Scilab et Matlab

Cette partie présente les routines principales utilisées lors de ce projet de maîtrise. Mise à part le code source d'ajustement des angles de visée, ces routines ont été développées durant mon stage Mitacs.

1. ► *partern_lignes_laterales_statique(.m et .sce)* : ce programme simule un ensemble de lignes de scan le long de deux positions à définir, contre un plan à définir également (orientation), les angles de tir du lidar en fonction des positions et les angles d'attitude du système. Les angles de visée entre le scanneur et la centrale inertielle sont également à définir à titre de désalignement (boresight). Un bruit blanc gaussien peut être appliqué aux données simulées. Ces patrons de lignes permettent de comprendre l'effet des mésalignements causés par les angles de visée et seront utilisés pour valider le programme Boresight Estimation. Convention NED pour l'extrant
Entrée : a, b, c, d, phi, theta, psi, phi_b, theta_b, psi_b, alpha, Pn (entrée manuelle)
Sortie : a : fichier txt contenant Xn, rbs, phi, theta, psi, alpha, rho
b : fichier txt contenant vbL, phi, theta, psi pour l'ajustage des angles de visée
2. ► *plan_exp_calib_statique.sce* : ce programme optimise un patron de lignes de scan pour l'ajustage statique afin de déterminer les paramètres optimaux du plan (C et D) et les angles d'attitude optimaux du système en calculant la distance angulaire entre deux vecteurs directeurs dans le repère n. Convention NED pour l'extrant
Entrée : phi, theta, psi, phi_b, theta_b, psi_b, alpha, rho (entrée manuelle)
Sortie : fichier txt contenant Distance angulaire, C_opt, D_opt, Roulis_opt, Tangage_opt, Lacet_opt.
3. ► *calc_range(.m et .sce)* : cette fonction permet de calculer la portée dans le repère de navigation en simulant des tirs lidar sur un plan à définir (A,B,C,D). On considère que les points Xn géoréférencés appartiennent à la surface scannée $S(Xn)=0$. Le code

source a été généré par Maple par résolution des équations 3.36 et 3.38 pour donner 3.40. Convention NED pour l'extrait

Entrée : a, b, c, d, phi, theta, psi, phi_b, theta_b, psi_b, alpha, Pn

Sortie : distance du plan dans le repère n pour chaque angle de dépointage alpha

4. ► *plotsurface.m* : cette fonction permet de faire une représentation graphique d'une surface verticale en spécifiant les paramètres A, B, C et D du plan ; il permet aussi de représenter le profil d'un nuage de points simulé pour visualiser l'effet des mésalignement causés par les angles de visée : roulis, tangage et lacet. Convention NED pour l'extrait
Entrée : a, b, c, d, fichier txt provenant de la sortie a du programme *partern_lignes_laterales_statique.m*

Sortie : graphique d'un plan vertical, graphiques des vues XY, YZ, XZ du plan.

5. ► *Extract_rbS_NED_MX2.sce* : ce programme est préparé pour calculer le coefficient directeur rbS du scanneur SLM-250 à partir des données .csv extrait de Trident avec l'outil « Plane Extract ». Deux modes de calcul sont proposés. Soit en utilisant l'angle d'oscillation à 89.5° ou en utilisant celle à 90°. Cela affecte la coordonnée Z du repère SOCS. Le programme peut aussi être utilisé pour produire directement les vecteurs directeurs VbL servant à l'ajustage des angles de visée dans le dernier module du programme. Une correction du biais de portée peut être appliquée à cette étape. Convention NED pour l'extrait.

Entrée : fichier .csv contenant 16 colonnes dont Xn, d, o, rho, Pn, phi, theta, psi, CoM, sigma (phi, theta, psi)

Sortie :

a : fichier .txt contenant les retours dans le repère local bS du scanneur ainsi que les valeurs d'attitude (phi, theta, psi) associées à chaque retour lidar.

b : fichier txt contenant vbL, phi (rad), theta(rad), psi(rad) pour l'ajustage des angles de visée (série de stations)

c : fichier log contenant les statistiques sur chaque patron de lignes et sur chaque ligne de scan (nombre de points, moyenne des incertitudes des angles d'attitude, distance par rapport au plan)

6. ► *Extract_VbL_NED_MX2.sce* : ce programme est préparé pour calculer les vecteurs directeurs VbL de chaque ligne de scan du patron de lignes servant à l'ajustage statique des angles de visée du MX2. Il s'agit de la continuité à l'étape de nettoyage des lignes de scan dans CloudCompare. Les VbL sont définitifs. Convention NED pour l'extrait
Entrée : fichier .txt contenant les retours dans le repère local bS du scanneur ainsi que les valeurs d'attitude (phi, theta, psi) associées à chaque retour lidar.

Sortie :

a : fichier txt contenant vbL, phi (rad), theta(rad), psi(rad) pour l'ajustage ds angles de visée (série de stations)

b : fichier log contenant les statistiques sur chaque patron de ligne et sur chaque ligne de scan (nombre de points, moyenne des incertitudes des angles d'attitude, distance par rapport au plan)

7. ► *BoresightEstimation.sce* : ce programme est le code source adapté pour ajuster les angles de visée d'un SLM. Convention NED pour l'extrait. En plus de l'original, deux versions différentes du programme on été préparées :

V2 : pour les expériences liées à l'optimisation du patron de lignes

V3 : pour l'ajustage des angles de visée du MX2

Les principales contributions sont :

1. Permettre à l'utilisateur d'entrer les orientations relatives entre l'IMU et le scanneur
2. Permettre à l'utilisateur d'entrer les paramètres a, b, c du plan s'ils sont connus
3. Modifier le calcul d'initialisation de la normale en calculant une moyenne de l'ensemble des vecteurs normaux mesurés par produit vectoriel des vecteurs directeurs vbL exprimés dans le repère de navigation calculés précédemment par la routine Extract_VbL_NED_MX2.sce ou Extract_rbS_NED_MX2.sce.

4. Une version récente du programme a été adaptée pour le SLM du CIDCO. Les matrices de transformations de coordonnées (convention NED) et leur dérivé lors de la linéarisation du modèle mathématique ont été remplacées par les matrices du fabricant IXBlue (convention NWU) afin de s'adapter aux observations de l'IMU.

Entrée : fichier txt contenant vbL, phi (rad), theta(rad), psi(rad) pour l'ensemble des stations statiques d'ajustage par rapport au plan (série)

Sortie : fichier txt du résultat obtenu à partir des observations

Number of used stations: xx

=====

Roll Estimation in degrees: xx.xxxxxx

Pitch Estimation in degrees: xx.xxxxxx

Heading Estimation in degrees: xx.xxxxxx

STD Roll Estimation in degrees: xx.xxxxxx

STD Pitch Estimation in degrees: xx.xxxxxx

STD Heading Estimation in degrees: xx.xxxxxx

=====

Variance unit factor: x.xxxxxx

Chi2 Test: x

8. ► *Mcompute_rbS_UTM_to_LGF.sce* : ce programme est préparé pour calculer le coefficient directeur rbS du scanneur SLM-250 du MX2 à partir des points Xn et Pn récupérés avec Trident. Il permet de faire la rétroingénierie entre les différents repères d'un SLM : bS, bI, TRF, LFG, UTM. Les routines développées dans mon cours GMT2001 ont été reprises avec Scilab.

Convention ENU (repère cartographique Trident) pour l'intrant

Convention NED (IMU) pour l'extrant

Entrée : fichier .csv contenant 16 colonnes dont X_n , d , o , ρ , P_n , ϕ , θ , ψ , CoM, σ (ϕ , θ , ψ)

Sortie : fichier .txt contenant 9 colonnes dont rbS roll pitch heading lat_ori lon_ori X_{ori} Y_{ori} Z_{ori}

9. ► *Mcompute_cloud_distance.sce* : ce programme est préparé pour calculer les distances relatives entre les deux tours (site 3) dans le repère cartographique. Distances dans la projection MtM7 SCOPQ. Les distances 3D sont aussi calculées. Convention ENU

Entrée : fichier txt. contenant les points X_n du SX10 ou du MX2

Sortie : fichier txt. contenant les distances entre deux nuages à plusieurs élévations en Z

10. ► *calc_lat_IMU_lidar.m* : cette fonction est préparée pour calculer la latence IMU-lidar à partir des vitesses angulaires XYZ de l'IMU données par POSPac et la distance D_n mesurée dans Trident.

Entrée : fichier txt. contenant les vitesses angulaires w_1 w_2 w_3 et le temps GPS ; la distance D_n

Sortie : valeur latence IMU-lidar dt

D.2 Vitesses propres calculées par POSPac (latence POS-lidar)

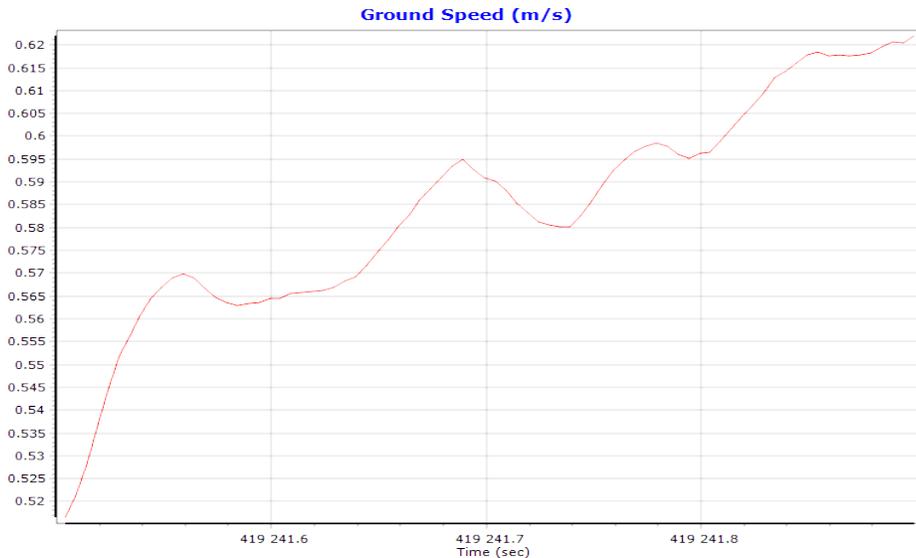


FIGURE D.1 – Vitesse lors du passage 1 au plan S2

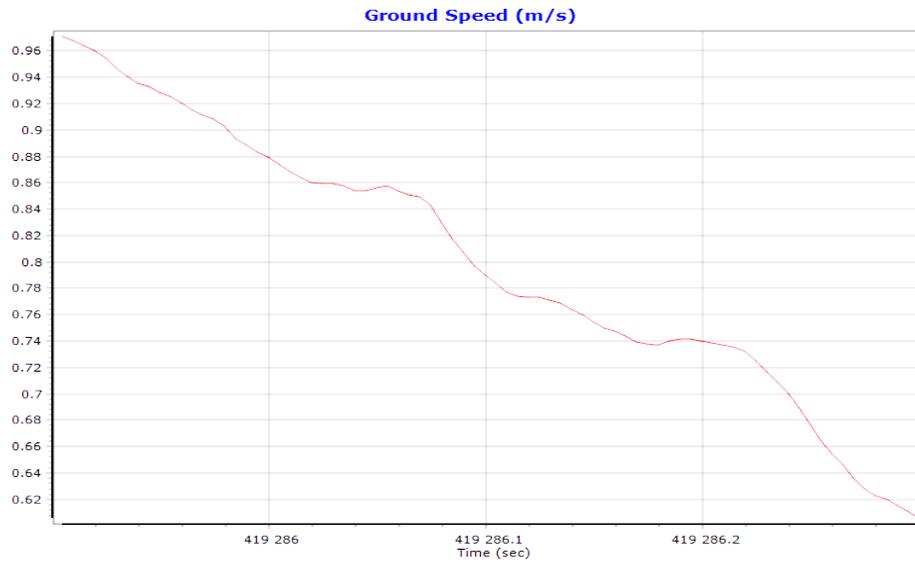


FIGURE D.2 – Vitesse lors du passage 2 au plan S2

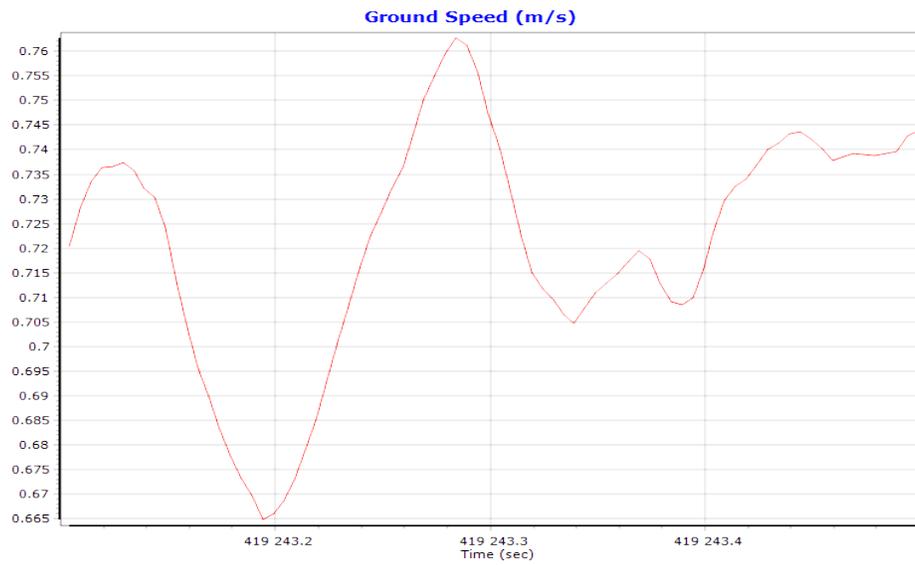


FIGURE D.3 – Vitesse lors du passage 1 au plan S3

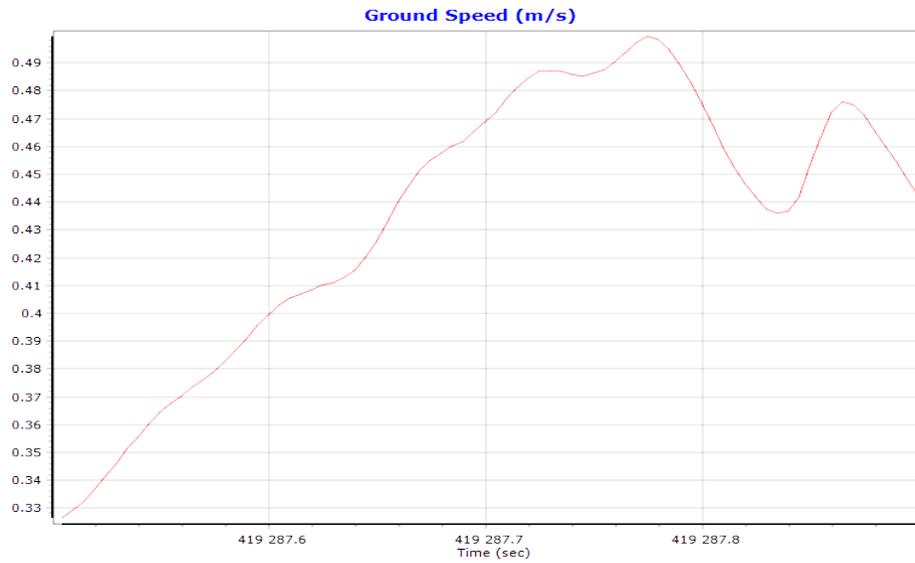


FIGURE D.4 – Vitesse lors du passage 2 au plan S3

D.3 Vitesses angulaires calculées par POSPac (latence IMU-lidar)

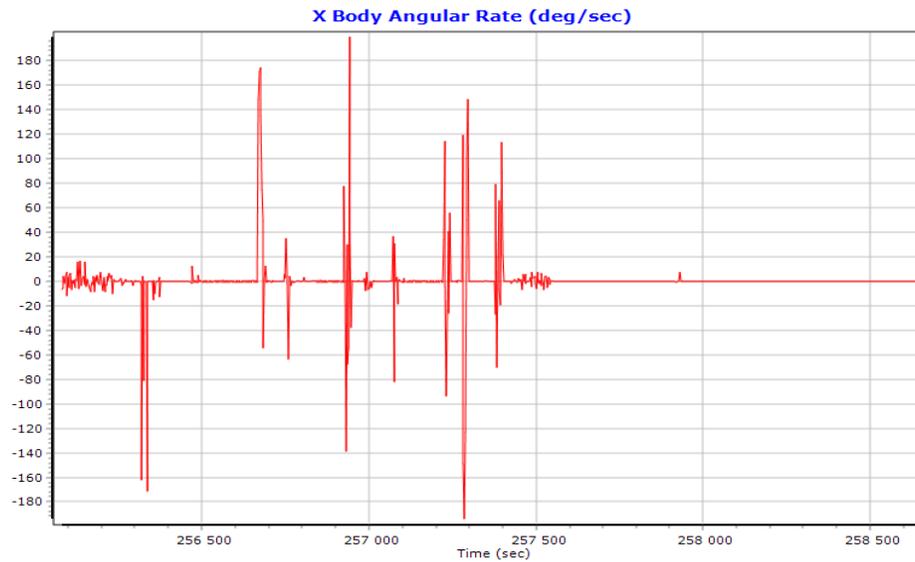


FIGURE D.5 – Vitesse angulaire : levé du 29-05-2018

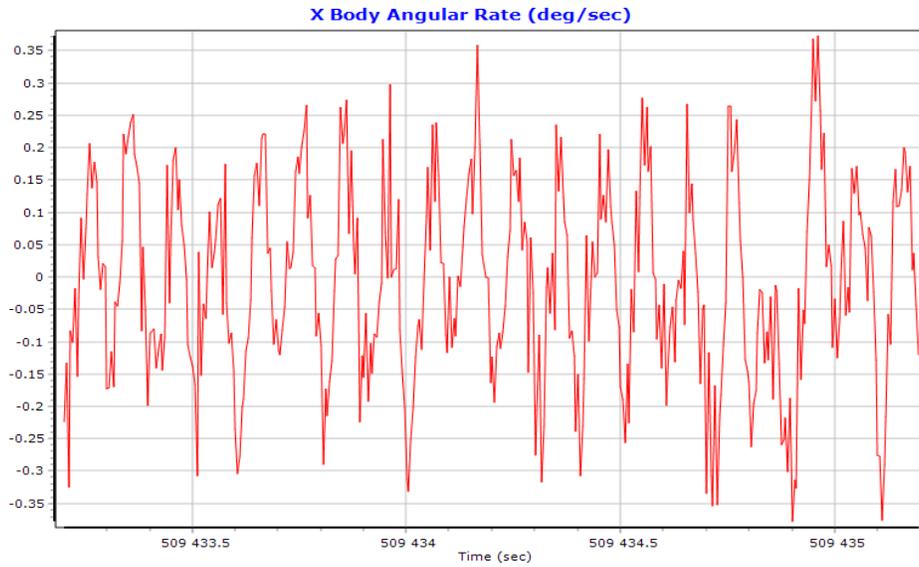


FIGURE D.6 – Vitesse angulaire : levé du 15-06-2018

D.4 Performances POS LV220 des levés en mode statique du 16-05-2018 et du 20-08-2018

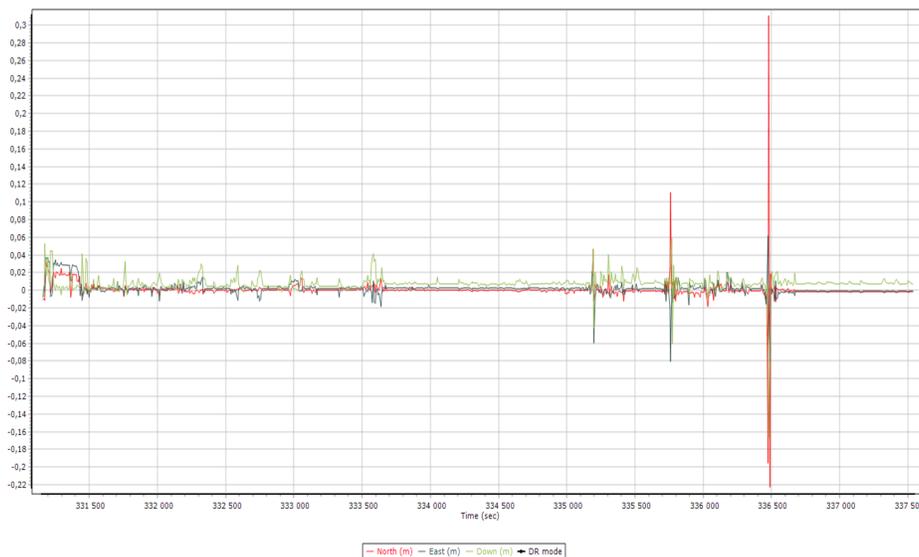


FIGURE D.7 – SBET IAKAR 16052018

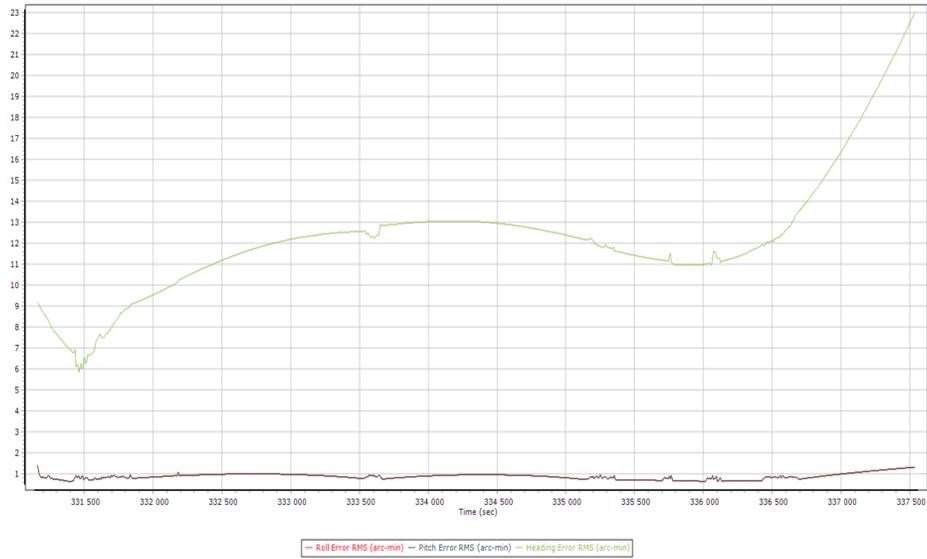


FIGURE D.8 – Incertitudes en RMS des angles de navigation $\phi\theta\psi$ 16052018

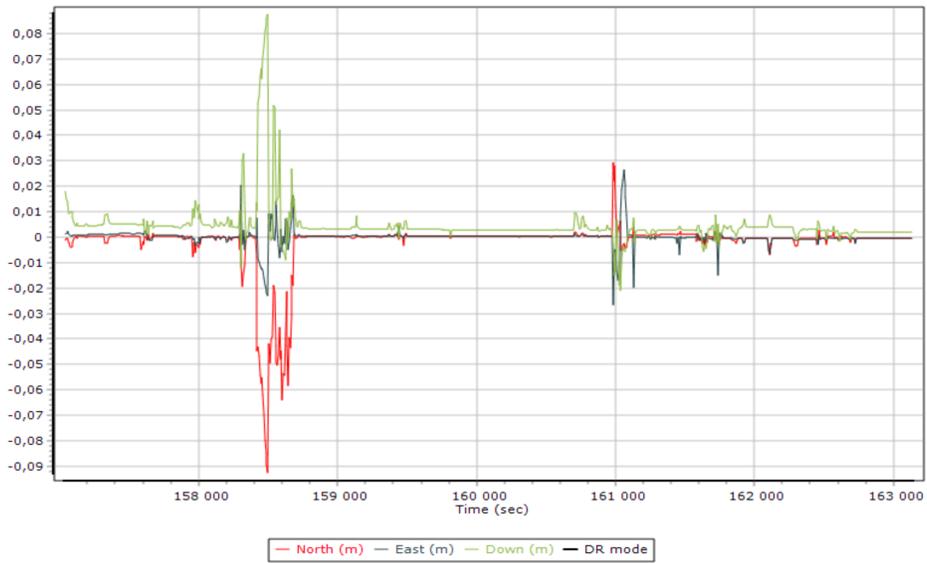


FIGURE D.9 – SBET IAKAR 20082018

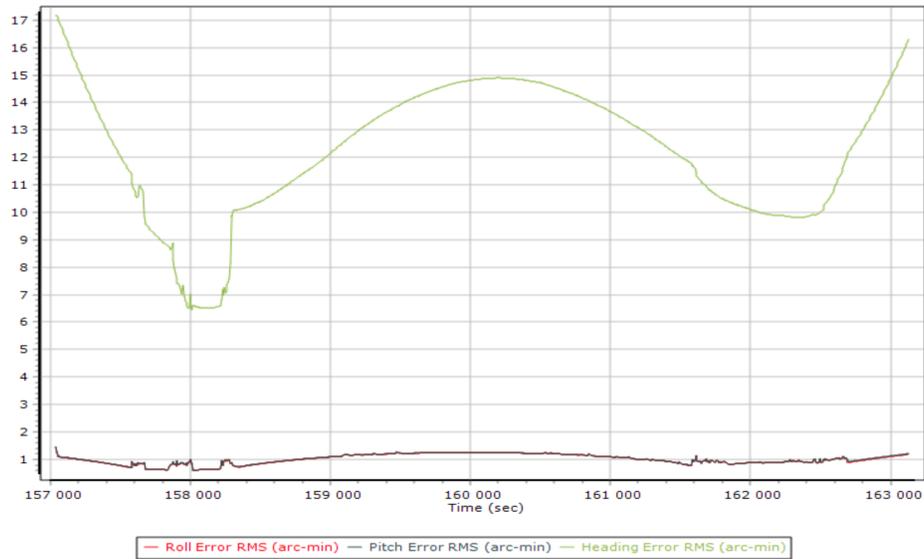


FIGURE D.10 – Incertitudes en RMS des angles de navigation $\phi\theta\psi$ 20082018

D.5 Performances POS LV220 des levés en mode dynamique



FIGURE D.11 – SBET IAKAR 01112017

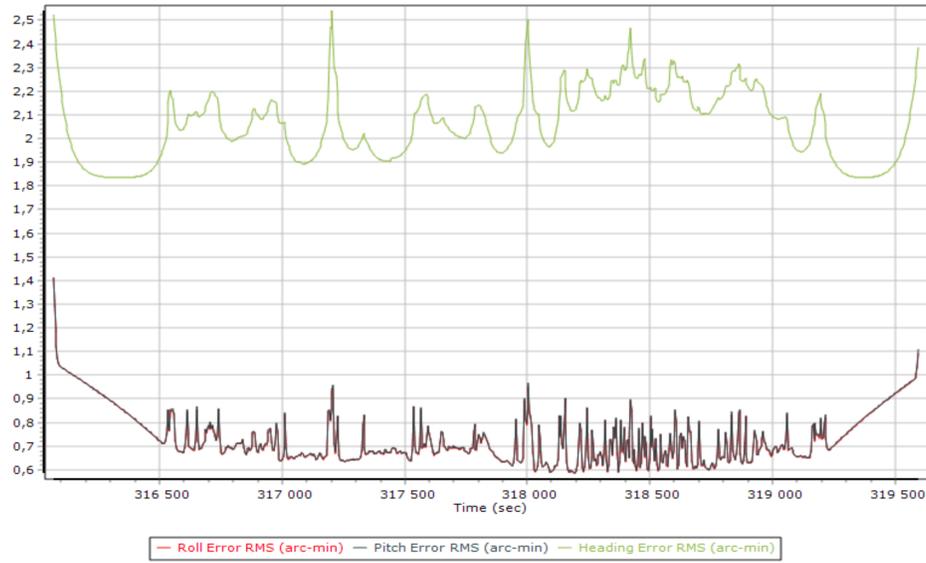


FIGURE D.12 – Incertitudes en RMS des angles de navigation $\phi\theta\psi$ 01112017

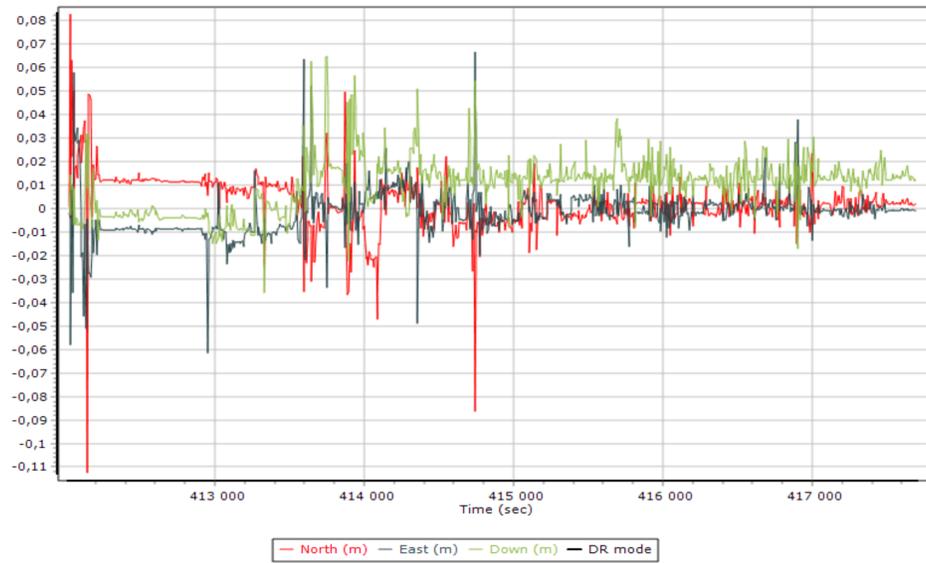


FIGURE D.13 – SBET IAKAR 24052018

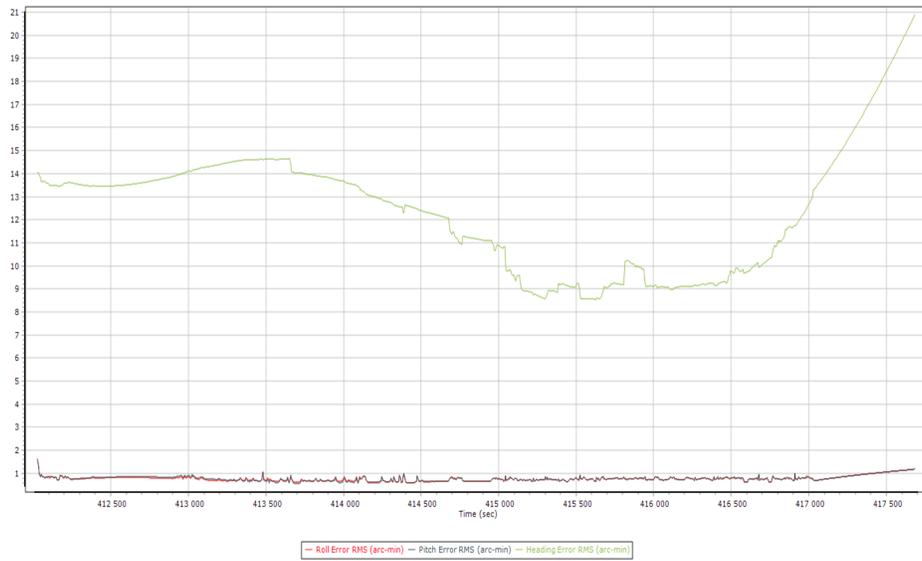


FIGURE D.14 – Incertitudes en RMS des angles de navigation $\phi\theta\psi$ 24052018

Annexe E

Photos lors de l'acquisition des données terrain

E.1 Levés statiques

Cette partie présente quelques photos prises sur le terrain lors des levés statiques au Site 1.

E.1.1 Levé du 12 10 2017



FIGURE E.1 – Station D5 levé statique.



FIGURE E.2 – Station B2 levé statique



FIGURE E.3 – Station E2 levé statique

E.1.2 Levé du 12 06 2018



FIGURE E.4 – Station A1 levé statique

E.2 Levés latence

E.2.1 Levé POS-lidar du 24 05 2018



FIGURE E.5 – Passage devant les plans S1 S2 S3 en mode dynamique avec SLM monté sur un charriot

E.2.2 Montage IMU-lidar



FIGURE E.6 – Montage mécanique : charriot



FIGURE E.7 – Montage mécanique : cadre pour rotation angulaire en roulis

E.3 Levés biais de portée



FIGURE E.8 – Acquisition lidar mobile au site 3



FIGURE E.9 – Acquisition lidar mobile au site 5 : les 2 antennes GNSS sont utilisées.

E.4 Levés en mode dynamique (véhicule)



FIGURE E.10 – MX2 + G360 montés sur le rack du véhicule



FIGURE E.11 – Opérateur chargé de l'enregistrement des données équipé d'un ordinateur portable.

E.5 Levés lidar terrestre statique SX10



FIGURE E.12 – Acquisition des données lidar avec la SX10 au site 3. À gauche, station à la tour nord et à droite station à la tour sud



FIGURE E.13 – Station UL 1604, acquisition des données lidar avec la SX10 au site 1

Annexe F

Tests statistiques sur le facteur de variance

Cette annexe présente les tests statistiques sur le facteur de variance a posteriori S_0^2 .

F.1 Patron de lignes de 16 stations

TABLEAU F.1 – Test statistique pour la validation des solutions d’ajustage des angles de visée du SLM MX2 avec un patron de lignes de 16 stations

	$\frac{S_0^2}{\sigma_0^2} \geq \frac{\lambda_1}{n-u}$	$\frac{S_0^2}{\sigma_0^2} \leq \frac{\lambda_2}{n-u}$
17-05-2018, Sol. 1 à 3	$1.00 \geq 0.2367$	$1.00 \leq 2.4324$
17-05-2018, Sol. 4	$1.00 \geq 0.2367$	$1.00 \leq 2.4324$
17-05-2018, Sol. 5	$0.42 \geq 0.2367$	$0.42 \leq 2.4324$
24-05-2018, Sol. 1 à 3	$0.50 \geq 0.2367$	$0.50 \leq 2.4324$
24-05-2018, Sol. 4	$1.00 \geq 0.2367$	$1.00 \leq 2.4324$
24-05-2018, Sol. 5	$0.72 \geq 0.2367$	$0.72 \leq 2.4324$
12-06-2018, Sol. 1 à 4	$1.00 \geq 0.2367$	$1.00 \leq 2.4324$
21-08-2018, Sol. 1 à 5	$1.00 \geq 0.2367$	$1.00 \leq 2.4324$

avec :

$$\lambda_1 = \chi_{(n-u)}^2(1 - \alpha)/2$$

$$\lambda_2 = \chi_{(n-u)}^2(1 + \alpha)/2$$

$$\alpha = 0.99$$

F.2 Patron de ligne de 36 stations

TABLEAU F.2 – Test statistique pour la validation des solutions d’ajustage des angles de visée du SLM MX2 avec un patron de lignes de 36 stations

	$\frac{S_0^2}{\sigma_0^2} \geq \frac{\lambda_1}{n-u}$	$\frac{S_0^2}{\sigma_0^2} \leq \frac{\lambda_2}{n-u}$
12-10-2017, Sol. 1 à 3	$1.00 \geq 0.4664$	$1.00 \leq 1.7743$
12-10-2017, Sol. 5	$0.70 \geq 0.4664$	$0.70 \leq 1.7743$
17-05-2018, Sol. 1 à 3	$1.00 \geq 0.4664$	$1.00 \leq 1.7743$
17-05-2018, Sol. 5	$0.70 \geq 0.4664$	$0.70 \leq 1.7743$
12-06-2018, Sol. 1 à 3	$1.76 \geq 0.4664$	$1.76 \leq 1.7743$
12-06-2018, Sol. 4	$0.56 \geq 0.4664$	$0.56 \leq 1.7743$
21-08-2018, Sol. 1 à 5	$1.00 \geq 0.4664$	$1.00 \leq 1.7743$

avec :

$$\lambda_1 = \chi_{(n-u)}^2(1 - \alpha)/2$$

$$\lambda_2 = \chi_{(n-u)}^2(1 + \alpha)/2$$

$$\alpha = 0.99$$