



Évaluation du potentiel d'une technologie de positionnement intérieur par trilatération ultrasonore pour l'amélioration des trajectoires d'un système lidar mobile

Mémoire

Mehdi Chougrad

Maîtrise en sciences géomatiques - avec mémoire
Maître ès sciences (M. Sc.)

Québec, Canada

© Mehdi Chougrad, 2021

**Évaluation du potentiel d'une technologie de
positionnement intérieur par trilatération
ultrasonore pour l'amélioration des trajectoires
d'un système lidar mobile**

Mémoire

Mehdi Chougrad

Sous la direction de :

Christian Larouche, directeur de recherche

Mir Abolfazl Mostafavi, codirecteur de recherche

Résumé

Depuis quelques années, les techniques de positionnement intérieur deviennent de plus en plus importantes et trouvent leur place dans divers domaines, dont l'arpentage souterrain. Le présent travail a été réalisé dans le cadre du projet MinEyes, dont l'un des principaux objectifs est d'améliorer le positionnement d'un système lidar mobile (SLM) à l'intérieur des tunnels miniers souterrains. Cela permettra d'effectuer une cartographie 3D précise et rapide de ces environnements. Cependant, l'absence de signal GNSS rend cette tâche difficile. L'une des solutions mise en place pour résoudre ce problème est l'utilisation d'une centrale inertielle. Cependant, l'un des inconvénients majeurs de cette technique est l'accumulation d'erreurs dans le temps ce qui provoque la dérive de la trajectoire. Nous proposons donc une méthode combinant un système de positionnement intérieur basé sur la trilatération ultrasonore et un SLM. Nous utilisons pour cela un ensemble de balises ultrasons fixes dont les positions sont connues et qui communiquent avec une cible ultrason mobile lui permettant d'estimer sa trajectoire. La qualité de la trajectoire ainsi estimée est évaluée à l'aide de données obtenues avec une station totale robotisée. Nos expériences ont démontré une incertitude constante de la trajectoire produite sur toute sa longueur. Les écarts obtenus sont de 2 cm pour la coordonnée X (axe suivant la largeur du corridor) et 4 cm pour la coordonnée Y (axe de déplacement de la cible mobile). Suite à la validation de la qualité de la trajectoire générée, nous avons procédé à l'intégration de la cible ultrason mobile sur un SLM servant à la localisation et la production de nuages de points 3D sur un robot conçu sur la plateforme Raspberry Pi, exploitant la librairie ROS (Robot Operating System) et permettant la production de nuages de points géoréférencés. La comparaison du nuage de points ainsi produit avec un nuage de points de référence produit avec un scanneur LiDAR 3D (Faro X130) a montré un écart uniforme ne dépassant pas 4 mm pour 67% de la zone couverte. Ce travail démontre donc le potentiel du système de navigation proposé, basé sur la technologie de trilatération ultrasonore, qui permet d'éviter la dérive d'une plateforme mobile en milieu intérieure.

Abstract

In recent years, indoor positioning techniques have become increasingly important and are finding their way into various fields, including underground surveying. The present work was carried out within the framework of the MinEyes project. One of its main goals is to improve the positioning of a mobile lidar system (MLS) inside underground mining tunnels. This will allow accurate and fast 3D mapping of these environments. However, the lack of a GNSS signal makes this task difficult. One of the solutions implemented to solve this problem is the use of an inertial measurement unit. However, one of the major drawbacks of this technique is the accumulation of errors over time, which causes the trajectory to drift. We therefore propose a method combining an indoor positioning system based on ultrasonic trilateration and an MLS. We use a set of fixed ultrasonic beacons whose positions are known, and which communicate with a mobile ultrasonic target allowing it to estimate its trajectory. The quality of the estimated trajectory is evaluated using data obtained simultaneously with a robotic total station. Our experiments demonstrated a constant uncertainty of the produced trajectory over its entire length. This uncertainty reaches 2 cm for the X coordinate (axis following the width of the corridor) and 4 cm for the Y coordinate (axis of movement of the mobile target). Following the validation of the quality of the generated trajectory, we proceeded to the integration of the mobile ultrasound target on an MLS used for the localization and the production of 3D point clouds of a robot designed on the Raspberry Pi platform, exploiting the ROS library (Robot Operating System) and allowing the production of georeferenced point clouds. The comparison of a point cloud produced in this way with a reference point cloud produced with a 3D LiDAR scanner (Faro X130) showed a uniform deviation not exceeding 4 mm for 67% of the area covered. This work demonstrates the potential of the proposed navigation system, based on the technology of ultrasonic trilateration, which allows avoiding the drift of a mobile platform in indoor environments.

Table des matières

Résumé.....	iii
Abstract	iv
Table des matières	v
Liste des tableaux	vii
Liste des figures	viii
Liste des abréviations	xi
Remerciements.....	xiii
Introduction	1
Chapitre 1 : Présentation du cadre du mémoire	2
1.1. Mise en contexte	2
1.2. Problématique	3
1.3. Hypothèse de recherche	4
1.4. Objectifs de recherche.....	5
Chapitre 2 : Revue de littérature	6
2.1. Introduction	6
2.2. Les défis du positionnement intérieur	6
2.3. Les algorithmes de positionnement intérieur	8
2.4. Les techniques de positionnement intérieur	11
2.5. Les indicateurs de performance d'un système de positionnement intérieur.....	24
2.6. Comparaison entre les techniques de positionnement intérieur	29
2.7. Conclusion	30
Chapitre 3 : Amélioration du positionnement d'un système Lidar dans un espace intérieur : méthodologie proposée, expérimentations, résultats obtenus et analyse	31
3.1. Introduction	31
3.2. Choix de la technologie de positionnement intérieur.....	31
5.1.	32
5.2.	32
3.3. Description du système de trilatération ultrasonore Marvelmind	32
3.4. Méthodologie adoptée.....	34
3.5. Évaluation initiale du système de positionnement Marvelmind	36
3.6. Conclusion :	54

Chapitre 4 : Intégration physique de la balise mobile avec un SLM: méthodologie, résultats obtenus et analyse	55
4.1. Introduction	55
4.2. Description des outils utilisés	55
4.3. Intégration physique de la balise mobile avec un Système Lidar Mobile (SLM).....	56
4.4. Acquisition des données avec le système intégré	58
4.5. Analyse de la qualité du nuage de points produit	59
4.6. Réalisation d'un test préliminaire dans les corridors du campus (environnement similaire au milieu minier souterrain)	64
4.7. Conclusion	67
Conclusion générale.....	69
Bibliographie.....	73
Annexes.....	76

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Analyse de la qualité des données acquises par le SLM minier souterrain uGPS Rapid Mapper	4
Tableau 2.1 Comparaison entre les techniques de positionnement intérieur, adaptée de (Mainetti et al., 2014)	30
Tableau 3.1 Résultats obtenus pour la comparaison de distances entre les balises fixes sous différentes conditions	39
Tableau 3.2 Comparaison entre les distances horizontales obtenues pour 8 points espacés de 2 m par le système Marvelmind et l'interféromètre laser avant géoréférencement des balises fixes	42
Tableau 3.3 Comparaison entre les distances horizontales obtenues pour 8 points espacés de 2 m par le système Marvelmind et l'interféromètre laser après géoréférencement des balises fixes	44
Tableau 3.4 Les coordonnées de 8 points d'observation obtenus par le système Marvelmind (Xm et Ym) et celles obtenues par la multi-station (Xs et Ys) dans la première configuration avec 4 balises	46
Tableau 3.5 Les coordonnées de 8 points d'observations obtenues par le système Marvelmind (Xm et Ym) et celles obtenues par la multi-station (Xs et Ys) dans la deuxième configuration avec 6 balises	50

Liste des figures

Figure 1.1 Exemple de la mine TauTona en Afrique du Sud qui possèdent 800 kilomètres de galeries souterraines (Ptak et al., 2018).....	2
Figure 1.2 Illustration de l'impact de l'accumulation des erreurs de navigation de l'IMU sur l'orientation et la position d'un véhicule (Han et al., 2014).....	3
Figure 1.3 Exemple de l'impact de la divergence de la solution de navigation sur la cartographie d'un tunnel faite à partir de deux nuages de points capturés à deux époques différentes (Lynch et al., 2017)	3
Figure 2.1 Relation entre la distance et l'intensité du signal (extraite à partir du matériel du cours WLAN Location Methods de l'Université de Finlande) (Heikki, 2004)	9
Figure 2.2 Le principe de positionnement par a) ToA b) AoA c) Hybride entre ToA et AoA	10
Figure 2.3 Le principe de la méthode CoO (Gu et al., 2009) : E2 et E3 sont les cibles à localiser et D est le détecteur. Le rectangle en pointillés est sa zone de proximité.....	10
Figure 2.4 Illustration du principe de fonctionnement du AGNSS : une liaison de données cellulaire est utilisée pour avoir accès aux données des satellites (Deng et al., 2009).....	12
Figure 2.5 Illustration du principe du positionnement par Locata : un réseau de pseudolites transmet des signaux similaires à ceux du GNSS vers l'utilisateur même dans un environnement intérieur (Rizos et al., 2010)	13
Figure 2.6 Illustration du processus de localisation par les méthodes SLAM (Frese et al., 2010).....	15
Figure 2.7 Exemple de marqueurs utilisés en positionnement optique (Mautz, 2012)	17
Figure 2.8 Positionnement ultrasonore par bat actifs (Koyuncu et al., 2010)	19
Figure 2.9 Principe de fonctionnement de la méthode RFID (Mainetti et al., 2014).....	23
Figure 2.10 Le principe de la technique UWB (Merz et al., 2008)	23

Figure 2.11 Indicateurs de performance d'un système de positionnement intérieur proposé par (Mautz, 2012)	25
Figure 3.1 Le kit de démarrage de Marvelmind (architecture non inverse) (Marvelmind, 2020).....	33
Figure 3.2 Interface du tableau de bord (Dashboard) du logiciel Marvelmind (Marvelmind, 2020). Les points verts représentent les balise fixes et les points bleus représentent différentes positions de la balise mobile.....	33
Figure 3.3 Diagramme descriptif de la méthodologie adoptée.....	35
Figure 3.4 Interféromètre laser du Laboratoire de métrologie	36
Figure 3.5 La multi-station Leica MS60	36
Figure 3.6 Configuration géométrique des 4 balises fixes au sein du laboratoire de métrologie	37
Figure 3.7 Configuration de l'expérimentation (1: rail, 2: balise mobile, 3: balise fixe).	41
Figure 3.8 Configuration géométrique du rail par rapport aux balises fixe	41
Figure 3.9 Différence entre les distances obtenues par le système Marvelmind et l'interféromètre avant et après géoréférencement	45
Figure 3.10 Disposition des points d'observation (en rouge) au milieu du laboratoire dont les positions sont estimées avec la configuration à 4 balises (9, 10, 13 et 2) et avec la configuration à 6 balises (9, 10, 13, 2, 4 et 7)	48
Figure 3.11 Distribution des observations de la balise mobile au niveau du point 1	49
Figure 3.12 Distribution des observations de la balise mobile au niveau du point 2	49
Figure 3.13 Trajectoire d'une ligne obtenue par le système Marvelmind à l'aller	52
Figure 3.14 Trajectoire d'une ligne obtenue par le système Marvelmind au retour	52
Figure 3.15 Trajectoire d'une boucle obtenue par le système Marvelmind	52
Figure 3.16 Comparaison entre la trajectoire aller Marvelmind et celle de la multi-station	53

Figure 3.17 Comparaison entre la trajectoire retour Marvelmind et celle de la multi-station	53
Figure 3.18 Comparaison entre la trajectoire en boucle Marvelmind et celle de la multi-station	53
Figure 4.1 RS-LiDAR-16 de RoboSense (robosense, 2021).....	56
Figure 4.2 IMU MTI-30 de xsense (xsens, 2021)	56
Figure 4.3 Le nano-ordinateur Raspberry Pi (Raspberry Pi, 2021).....	56
Figure 4.4 Système LiDAR (Robosense) et balise mobile (Marvelmind) intégré	58
Figure 4.5 Nuage de points acquis avec le système intégré géoréférencé à partir de la trajectoire Marvelmind	59
Figure 4.6 Nuage de points de référence du laboratoire de métrologie acquis avec le scanneur statique FARO X130	60
Figure 4.7 Illustration des distances entre le nuage de points acquis par notre système intégré et celui acquis par FARO selon une échelle de couleur du bleu (courte distance) vers le rouge (grande distance).....	61
Figure 4.8 Distribution des distances entre les deux nuages de points	62
Figure 4.9 Comparaison entre la trajectoire produite par le système Marvelmind et celle du système ICP	62
Figure 4.10 La moyenne des distances entre la trajectoire de Marvelmind et celle d'ICP calculé sur des intervalles de 5s.....	63
Figure 4.11 Portion d'un corridor du campus de l'Université Laval (vue en plan à gauche et vue perspective à droite).....	64
Figure 4.12 Préparation du site d'acquisition dans un corridor du campus	65
Figure 4.13 Résultat du paramétrage effectué sur le logiciel Dashboard de Marvelmind ...	66
Figure 4.14 Trajectoire de la balise mobile générée à partir du fichier de données .log.....	66
Figure 4.15 Trajectoire de la balise mobile après suppression des coupures	67

Liste des abréviations

2D	Two Dimensions	Deux dimensions
3D	Three Dimensions	Trois dimensions
AGNSS	Assisted GNSS	GNSS assisté
AoA	Angle of Arrival	Angle d'arrivée
BIM	Building information model	Modèle d'information de bâtiments
CoO	Cell of Origin	Cellule d'origine
DGNSS	Differential GNSS	GNSS différentiel
EDM	Electronic Distance Meter	Distancemètre électronique
GNSS	Global Navigation Satellite System	Système global de navigation par satellites
IA	Inverse Architecture	Architecture inverse
ID	Identifiant	Identifiant
IMU	Inertial Measurement Unit	Unité de mesures inertielles
LED	Light-Emitting Diode	Diode électroluminescente
NIA	Non Inverse Architecture	Architecture non inverse
RSSI	Received Signal Strength Indicators	Indicateurs de la force du signal reçu
SLAM	Simultaneous localisation and mapping	Localisation et cartographie simultanées
SLM/MLS	Mobile LiDAR System	Système LiDAR Mobile

TDoA	Time Difference of Arrival	Différence du temps d'arrivée
ToA	Time of Arrival	Temps d'arrivée
UWB	Ultra-WideBand	Bande ultra-large
WLAN	Wireless Local Area Network	Réseau local sans fil

Remerciements

J'aimerais tout d'abord remercier mon directeur de recherche, professeur Christian Larouche, pour son appui, disponibilité et patience tout au long de ce projet. Il n'a ménagé aucun effort pour s'assurer que ce travail soit fructueux à travers ses conseils et ses enseignements pertinents. Sa vaste expérience, tant comme encadrant que comme chercheur en métrologie, a alimenté ma réflexion et m'a apporté les outils méthodologiques nécessaires à la conduite de ce travail. Aussi, ce travail n'aurait pas été possible sans mon codirecteur de recherche, professeur Mir Abolfazl Mostafavi. Ses remarques et observations judicieuses ont grandement enrichi cette recherche et ont contribué à définir sa direction. Je remercie aussi Martin Grenon d'avoir accepté d'examiner ce travail et l'enrichir de ces remarques.

Je remercie également le laboratoire Norlab de l'Université Laval pour son soutien logistique, sans lequel ce projet n'aurait pas porté ses fruits. Merci au professeur François Pomerleau et à l'étudiant au doctorat Simon-Pierre Deschênes, pour le temps et l'effort investis pour m'aider à mettre en place le système intégré. J'ai pu, grâce à leur soutien, effectuer un réel travail interdisciplinaire, mêlant géomatique et robotique.

Je remercie Mohsen Hassanzadeh Shahraji avec qui j'ai eu la chance de travailler. Je le remercie pour son implication dans le projet, son enthousiasme et ses conseils. J'adresse aussi mes remerciements à monsieur Guy Jr. Montreuil, technicien expert au Laboratoire de métrologie pour sa disponibilité et son écoute. Merci également à tous les partenaires du projet MinEyes pour leur soutien et leur collaboration, à savoir la compagnie Pecktech, le Centre de recherche en données et intelligence géospatiales (CRDIG) de l'Université Laval, le Centre de Géomatique du Québec (CGQ) et le Fonds de Recherche sur la Nature et le Développement de Québec (FRQNT) pour le financement de ce projet dans le cadre du programme de développement durable du secteur minier.

Enfin, je remercie le Département des sciences géomatiques de l'Université Laval, pour l'accueil et les conditions de travail privilégiés qui m'ont été offerts malgré le contexte exceptionnel de crise sanitaire causée par la pandémie de Covid-19.

Introduction

Le présent mémoire porte sur la problématique de positionnement dans les tunnels miniers souterrains. L'objectif principal de cette recherche est d'améliorer la précision des levés miniers souterrains acquis par les systèmes LiDAR mobiles (SLM) en réduisant la dérive observée au niveau des trajectoires. Cette dérive est généralement due à l'accumulation des erreurs au niveau de la centrale inertielle utilisée. Cela nous permettra de produire des nuages de points géoréférencés d'une qualité uniforme sur de longs corridors miniers.

Ce mémoire de maîtrise est organisé comme suit. Le chapitre 1 présente une mise en contexte du projet de recherche et formule l'hypothèse principale de la recherche ainsi que ses objectifs. Le chapitre 2 fournit une revue des méthodes de positionnement intérieur existantes, leurs avantages, inconvénients, incertitudes ainsi que les principaux indicateurs de performance utilisés permettant de comparer les différents systèmes. Le chapitre 3 présente d'abord une analyse comparative entre les différentes techniques de positionnement intérieur selon certains indicateurs de performance. Il explique ensuite la méthodologie suivie pour évaluer les différentes composantes du système de positionnement choisi et la qualité des trajectoires produites. Il présente finalement les résultats des expérimentations menées et fournit une analyse de ces résultats. Le chapitre 4 détaille les étapes suivies pour intégrer le système de positionnement au SLM et présente les résultats d'acquisition par ce système intégré. Le mémoire termine avec une conclusion globale de ce travail de recherche ainsi que des recommandations pour la poursuite des travaux.

Chapitre 1 : Présentation du cadre du mémoire

Ce chapitre décrit le contexte du travail de recherche proposé et sa justification. Il présente également la problématique à laquelle le présent mémoire répond, l'hypothèse de recherche sur laquelle nous basons notre démarche et l'objectif principal ainsi que les objectifs spécifiques de ce travail.

1.1. Mise en contexte

L'arpentage souterrain, et en particulier à l'intérieur des tunnels miniers souterrains, nécessite une méthode de positionnement intérieur fiable et précise. Dans ce sens, les techniques existantes d'arpentage comme les scanners LiDAR statiques, ne sont pas adaptées à ces environnements complexes, notamment à cause des grandes dimensions des corridors à couvrir (Figure 1.1). C'est ainsi que les systèmes LiDAR mobiles (SLM) présentent un grand potentiel pour la modélisation 3D dense et précise des mines souterraines s'étendant sur de longs corridors. De plus, comme il s'agit d'environnements intérieurs fermés, le positionnement à l'intérieur des tunnels peut bénéficier de la panoplie de méthodes de localisation intérieure déjà établies. En effet, les nouvelles technologies de positionnement intérieur, notamment celles basées sur la géolocalisation sans fil, permettent souvent un positionnement fiable et efficace.

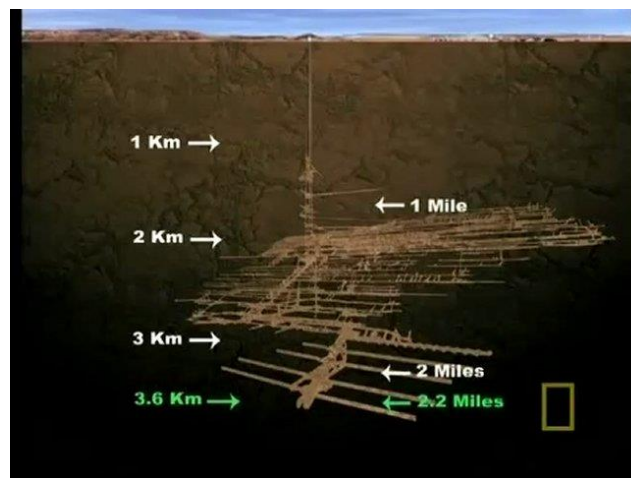


Figure 1.1 Exemple de la mine TauTona en Afrique du Sud qui possèdent 800 kilomètres de galeries souterraines (Ptak et al., 2018)

1.2. Problématique

Les signaux GNSS ne sont pas disponibles dans les espaces intérieurs, ce qui impose une entrave majeure à l'estimation précise de la position de la plateforme sur laquelle est monté le SLM et par conséquent au géoréférencement du nuage de points produit. Une solution potentielle est d'utiliser une centrale inertielle (IMU) dont les observations peuvent fournir une solution de navigation. Cependant, L'accumulation des erreurs avec le temps cause une dérive de la solution de positionnement. La dérive de la trajectoire du véhicule est illustrée dans la Figure 1.2.

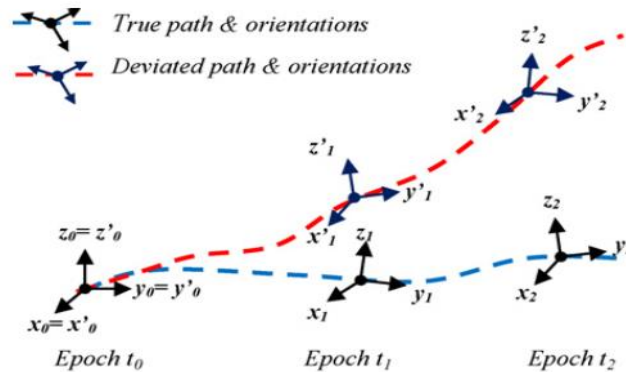


Figure 1.2 Illustration de l'impact de l'accumulation des erreurs de navigation de l'IMU sur l'orientation et la position d'un véhicule (Han et al., 2014)

La dérive des trajectoires engendre des distorsions qui empêchent la comparaison temporelle entre deux nuages de points du même espace (Figure 1.3).

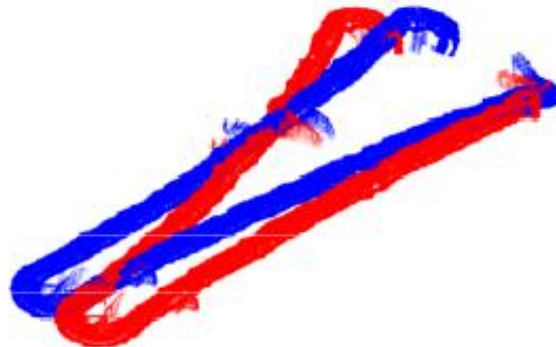


Figure 1.3 Exemple de l'impact de la divergence de la solution de navigation sur la cartographie d'un tunnel faite à partir de deux nuages de points capturés à deux époques différentes (Lynch et al., 2017)

Parmi les solutions récentes, on retrouve le SLM uGPS Rapid Mapper (Pecktech, 2021) pour faire la cartographie 3D souterraine de façon simple et efficace. Cependant, une analyse de la qualité des données acquises par un tel système a montré que les erreurs observées au niveau des trajectoires ne correspondent pas toujours aux erreurs théoriques. Le Tableau 1.1 montre que pour une longue trajectoire, l'erreur observée est presque deux fois l'erreur théorique. Bien qu'il présente un grand potentiel pour la cartographie d'un long corridor minier souterrain, ce système montre encore des limites de précision et d'utilisation dans différentes conditions.

Tableau 1.1 : Analyse de la qualité des données acquises par le SLM minier souterrain uGPS Rapid Mapper

Tests effectués	Erreurs théoriques (0.5% × distance) (cm)	Erreurs observées (cm)
Test 1: à 5 m	2.5cm	7.4 cm
Test 2: à 20 m	7.5 cm	7.6 cm
Test 3: à 35 m	17.5 cm	32 cm

La question qui se pose alors est la suivante : comment exploiter le réseau existant de points de contrôle d'une mine souterraine ainsi que les différents capteurs d'un SLM, à savoir l'IMU, le scanner LiDAR et les balises mobiles de localisation, pour déterminer la position et l'orientation du véhicule et produire un nuage de points géoréférencé de qualité?

1.3. Hypothèse de recherche

Pour mener notre recherche, nous faisons l'hypothèse que l'utilisation d'une technique de positionnement intérieur permettra de réduire la dérive de la trajectoire d'un SLM à l'intérieur d'un tunnel minier. Plus spécifiquement, le recours à un système de trilatération ultrasonore, nous permettra de produire des trajectoires de bonne qualité et par la suite de géoréférencer plus précisément les nuages de points. Afin de choisir les meilleures techniques de positionnement intérieur, nous devons d'abord effectuer une analyse comparative entre toutes ces méthodes.

1.4. Objectifs de recherche

1.4.1. Objectif principal

L'objectif principal est d'améliorer la précision des levés miniers souterrains acquis par un SLM en réduisant la dérive observée des trajectoires. Cela nous permettra de produire des nuages de points géoréférencés d'une qualité uniforme sur de longs corridors miniers.

1.4.2. Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques sont les suivants :

- la mise en place d'un réseau de navigation intérieure basé sur la trilatération ultrasonore;
- la validation de la qualité de la trajectoire produite au moyen de cette technologie de trilatération ultrasonore; et
- l'intégration de cette technologie à un SLM et l'évaluation de la qualité du nuage de points produit.

Chapitre 2 : Revue de littérature

2.1. Introduction

Durant les dernières années, l'utilisation des techniques de positionnement intérieur devient essentielle et trouve son usage dans divers domaines allant du secteur de la santé pour la localisation des patients à l'intérieur des hôpitaux jusqu'aux applications domestiques en passant par les applications de surveillance et monitoring. Le positionnement intérieur trouve également des applications dans le sauvetage en localisant les personnes en état de détresse en cas de catastrophes naturelles par exemple. En sus, certaines industries sollicitent également les techniques de positionnement intérieur pour leurs besoins. Nous citons à titre d'exemple les besoins de navigation à l'intérieur des centres commerciaux, d'aéroports ou encore les grands bâtiments des campus souvent reliés entre eux par des corridors souterrains comme c'est le cas d'ailleurs à l'Université Laval.

Même si les besoins en systèmes de positionnement intérieur précis sont de plus en plus grands, la tâche est rendue plus complexe en raison du caractère particulier de l'environnement intérieur.

2.2. Les défis du positionnement intérieur

Un système de positionnement intérieur a comme objectif de situer des objets ou des personnes dans un environnement intérieur. Cela peut comprendre également et selon les applications le suivi de la trajectoire de ces objets. Un système de positionnement intérieur vise donc à déterminer en temps réel la position d'un objet dans un environnement intérieur.

Pour se positionner dans un environnement à ciel ouvert, les systèmes de positionnement spatiaux GNSS (Global Navigation Satellite System) permettent d'atteindre des incertitudes centimétriques selon la technique utilisée (Perosanz, 2019). Le récepteur GNSS reçoit un signal depuis plusieurs satellites et parvient à déterminer sa position physique par trilatération. Cependant, les environnements intérieurs sont difficilement accessibles par les signaux des satellites GNSS de sorte qu'un récepteur situé à l'intérieur d'un bâtiment par

exemple sera incapable d'identifier les signaux correctement à cause de leur atténuation ou de leur réflexion. En effet, selon le coefficient diélectrique du matériau, les signaux GNSS seront atténués d'un facteur pouvant aller de 100 à 1000 (Mautz, 2009). La raison étant que les milieux intérieurs renferment des murs, des parois ainsi qu'une panoplie d'autres obstacles (revêtement, fourniture. etc.). Le GNSS est donc incapable de satisfaire aux exigences du positionnement intérieur. Par ailleurs, le positionnement intérieur pose également d'autres difficultés (Mainetti et al., 2014) :

- Les erreurs de multi-trajet causées par la nature encombrée de ces environnements;
- La difficulté d'avoir une ligne de visée. Cette exigence diffère selon la technique de positionnement à employer;
- L'atténuation des signaux par les obstacles; et
- Le changement rapide de l'environnement à cause du déplacement de personnes et d'objets.

Pour pouvoir contrer ces problèmes, le positionnement intérieur doit donc se faire avec une incertitude meilleure que le positionnement extérieur (Mainetti et al., 2014). Pour surmonter ces difficultés, un grand nombre de techniques de localisation intérieure ont été mises en place. Certaines s'appuient sur les systèmes spatiaux GNSS alors que d'autres font usage d'autres principes comme le temps d'arrivée (TOA – Time Of Arrival) ou la différence de temps d'arrivée (TDOA – Time Difference Of Arrival) (Al-Ammar et al., 2014). Ces dernières emploient souvent des techniques sans fil (wireless), optique, ultrasonore, etc. D'autre part, l'environnement intérieur présente également certains avantages pour le positionnement (Mautz, 2012) :

- Couverture petite;
- Influence minimale des conditions météorologiques (température et vent);
- Géométrie bien définie souvent constituée de surfaces planes orthogonales; et

- Infrastructure existante : Wifi et Bluetooth.

2.3. Les algorithmes de positionnement intérieur

Dans ce qui suit, nous traiterons des algorithmes de positionnement intérieur mis en place dans les dernières années. Liu et al. (2007) comparent différents algorithmes de positionnement : la triangulation, la proximité et le fingerprinting. Ces derniers peuvent être utilisés individuellement ou simultanément de façon à compenser pour les limites de chacun (Liu et al., 2007). Gu et al. (2009) en identifient un quatrième: l'analyse par vision.

2.3.1. La triangulation

Elle consiste à mesurer la distance entre une cible et des points de référence fixes (latération). La mesure de distances ne se fait pas directement à l'aide d'un EDM (Electronic Distance Meter) mais plutôt à travers la mesure de grandeurs intermédiaires dont (Liu et al., 2007):

- L'intensité des signaux reçus (RSS - Received Signal Strength) : dans ce cas, la distance entre la cible et les émetteurs de référence est estimée en calculant l'atténuation de l'intensité de l'onde émise. Cette dernière augmente avec la distance. La Figure 2.1 illustre la relation entre la distance et l'intensité du signal. Cette technique est possible seulement dans le cas des ondes radio;
- Le temps d'arrivée (ToA – Time of Arrival) : l'utilisation de cette méthode nécessite une synchronisation parfaite entre les cibles et les récepteurs. De plus, elle est sensible à l'effet multi-trajet;
- L'angle d'arrivée (AoA - Angle of Arrival) : elle se base sur le calcul de la différence de phase entre la cible et les émetteurs pour en déduire l'angle entre elles. Trois mesures sont suffisantes pour avoir la position 3D. De plus, la synchronisation entre la cible et les émetteurs n'est pas requise. Cependant, les systèmes opérant par mesure de l'angle d'arrivée sont souvent complexes et leur précision est fortement influencée par la distance entre les cibles et les émetteurs ; et

- La différence de temps d'arrivée (TDoA – Time Difference of Arrival) : cette technique permet la détermination d'une position relative des cibles par rapport aux émetteurs. Elle est aussi sensible aux multi-trajets.

La Figure 2.2 illustre le principe de calcul de la position par les 3 algorithmes ToA, AoA, TDoA

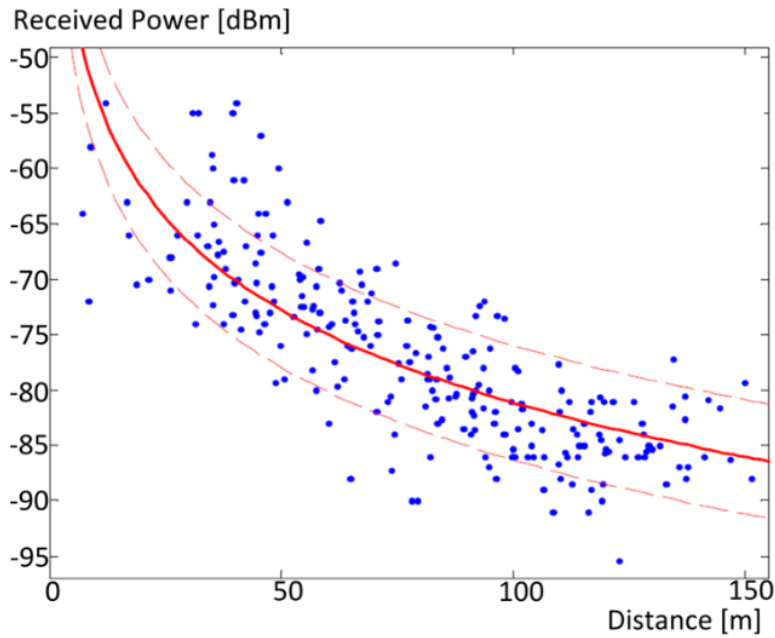


Figure 2.1 Relation entre la distance et l'intensité du signal (extraite à partir du matériel du cours WLAN Location Methods de l'Université de Finlande) (Heikki, 2004)

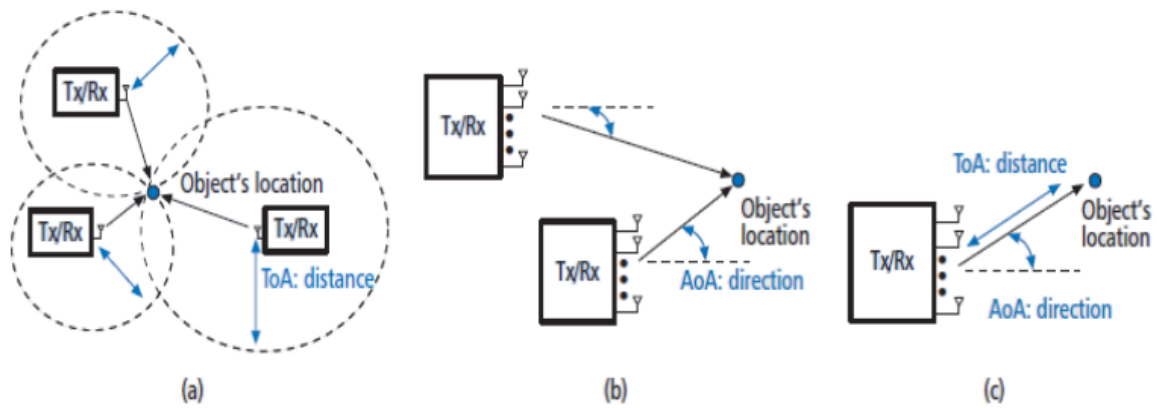


Figure 2.2 Le principe de positionnement par a) ToA b) AoA c) Hybride entre ToA et AoA

Tx : émetteur, Rx : récepteur

(Bai et al., 2014)

2.3.2. Les méthodes de proximité

Ces dernières se basent sur un réseau dense d'antennes dont la position est connue (Liu et al., 2007). Ainsi, une cible mobile détectée par l'une des antennes aura la même position que celle-ci. Ces méthodes fournissent donc une position relative par rapport aux antennes. Un exemple d'un algorithme de proximité est la cellule d'origine CoO (Cell of Origin). La Figure 2.3 illustre le principe de la méthode CoO. À partir d'un détecteur, une zone de proximité est spécifiée. Ensuite, les cibles sont localisées en déterminant si elles sont situées dans la zone de proximité du détecteur (Gu et al., 2009).

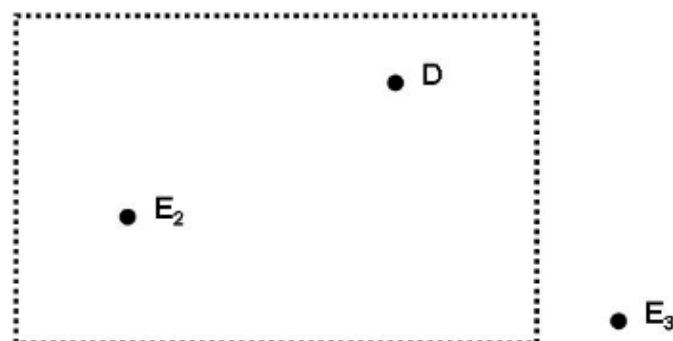


Figure 2.3 Le principe de la méthode CoO (Gu et al., 2009) : E_2 et E_3 sont les cibles à localiser et D est le détecteur. Le rectangle en pointillés est sa zone de proximité.

2.3.3. Les méthodes de fingerprinting

Dans un premier temps, ces méthodes recueillent des caractéristiques du signal (fingerprint) avant de les apparier pour déterminer la position de la cible (Liu et al., 2007). La caractéristique la plus utilisée est l'intensité du signal (RSS). Le déroulement se fait en deux temps (Gu et al., 2009): une phase d'entraînement hors ligne où un levé de la scène est réalisé de façon à recueillir les intensités et les coordonnées pour les besoins de comparaison. Ensuite, vient la phase en ligne où les intensités sont comparées à celles préalablement levées pour estimer la position de la cible.

2.3.4. Les méthodes d'analyse de vision

Ces méthodes se basent sur l'identification de la cible présente sur une ou plusieurs images acquises au moyen d'un réseau de caméras (Koyuncu et al., 2010).

Dans le contexte d'une technique de positionnement intérieur, un ou plusieurs de ces algorithmes sont utilisés.

2.4. Les techniques de positionnement intérieur

2.4.1. Les techniques utilisant le GNSS

AGNSS (Assisted GNSS)

Un récepteur GNSS utilisé pour le positionnement classique à ciel ouvert récupère à partir du signal du satellite différentes informations liées aux éphémérides, les corrections de temps à appliquer, etc. Comme le signal est bloqué ou fortement atténué à l'intérieur, une liaison de données par téléphone portable est utilisée pour avoir accès à ces données (Mautz, 2009). Par conséquent, le récepteur AGNSS pourra calculer sa position. Cela nécessite généralement un temps d'observation plus long dans le but d'améliorer le rapport signal sur bruit. Cette technique permet d'atteindre une incertitude entre 5 et 50 m (Liu et al., 2007). Pour pouvoir atteindre des incertitudes centimétriques, l'utilisation des techniques DGNSS (Differential

GNSS) est requise (Mautz, 2009). La Figure 2.4 illustre le principe des méthodes basées sur le AGNSS.

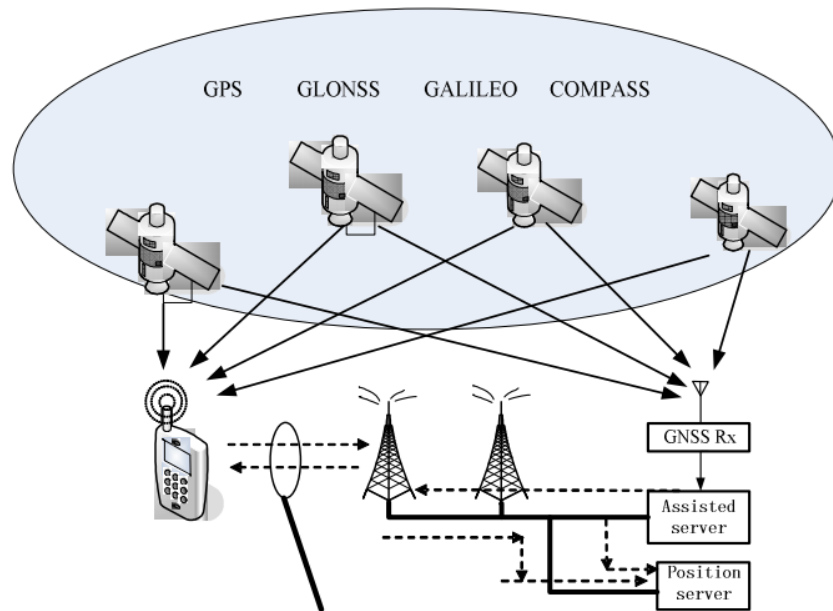


Figure 2.4 Illustration du principe de fonctionnement du AGNSS : une liaison de données cellulaire est utilisée pour avoir accès aux données des satellites (Deng et al., 2009)

Locata

Il s'agit d'un réseau terrestre de pseudolites. Les pseudolites sont un ensemble d'émetteurs récepteurs synchronisés dans le temps générant des signaux similaires à ceux transmis par les satellites GNSS (Liu et al., 2007) (Figure 2.5). Ces pseudolites transmettent des signaux GNSS et assurent des incertitudes comparables à celui-ci (Rizos et al., 2010). Ces incertitudes en temps réels sont de l'ordre de 1 mm et peuvent aller jusqu'à 6 cm (Mautz, 2009). Comme dans le cas du GNSS, le positionnement est réalisé par les mesures de différences de phases de l'onde porteuse. L'utilisation des pseudolites complète les mesures de distances requises par le récepteur dans le contexte du positionnement intérieur.

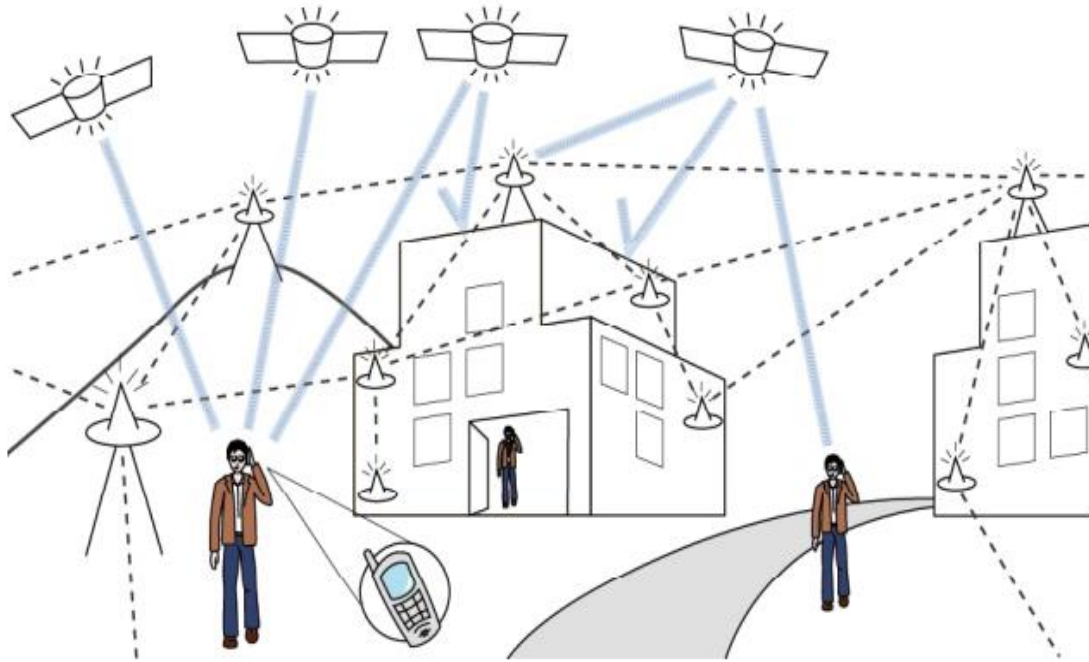


Figure 2.5 Illustration du principe du positionnement par Locata : un réseau de pseudolites transmet des signaux similaires à ceux du GNSS vers l'utilisateur même dans un environnement intérieur (Rizos et al., 2010)

2.4.2. Les techniques utilisant les stations totales

Les stations totales sont très utilisées en géodésie et en topographie pour le calcul de position de cibles en 2D et 3D. L'observation des angles horizontaux et verticaux (zénithaux) en conjonction avec les distances permet d'obtenir les coordonnées 3D de la cible (Mautz, 2012). Cependant, leur utilisation en positionnement intérieur est limitée car elles nécessitent souvent un réglage et un paramétrage compliqué et l'existence d'une ligne de visé avec les cibles. De plus, le coût du matériel est important.

2.4.3. Les techniques utilisant les scanners laser terrestres

Les scanners lasers terrestres permettent l'acquisition et la numérisation d'une scène en 3D. Le nuage de points résultant constitue une reproduction fidèle 3D de la scène d'acquisition. Les scanners laser sont très utiles en topographie vu qu'ils permettent la cartographie de grandes superficies en intégrant les nuages de points adjacents et complémentaires. Cependant, leur utilisation pour le positionnement intérieur n'est pas pratique vu que ce dernier exige souvent un positionnement en temps réel.

2.4.4. Les techniques utilisant les SLM

Les SLM sont communément utilisés pour la cartographie et l'acquisition de données dans des environnements extérieurs couvrant de longs corridors (routiers, ferroviaires, côtiers, etc.). Dans ce cas, le GNSS est utilisé pour obtenir des nuages de points géoréférencés. Étant donné l'absence des signal GNSS dans les environnements intérieurs, d'autres techniques de positionnement sont utilisées. Les plus connues sont les algorithmes SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) qui utilisent la technique ICP (Iterative Closest Point) pour produire un nuage de points global de l'environnement intérieur.

Les algorithmes SLAM traite le problème de localisation d'un système mobile dans un environnement intérieur. Ce système mobile est équipé d'un ensemble de capteurs lui permettant d'observer son environnement (LiDAR, caméra, centrale inertielle, etc.) (Birk et al., 2016). Le SLAM permet d'estimer simultanément la position du mobile et de générer une carte de son environnement constituée d'un ensemble de points repères. Ces points sont souvent des objets de l'environnement facilement identifiables à des positions fixes comme les coins de mur ou d'autres objets saillants. Le processus de localisation par la méthode SLAM est illustré dans la Figure 2.6. Dans cet exemple, un mobile équipé d'une caméra mesure la position relative d'un ensemble de points repères situés au sol (les cercles blanc). Cette position relative est illustrée par les lignes jaunes. En même temps, le déplacement du mobile est calculé par une centrale inertielle. Finalement, on a une estimation de la position du mobile ainsi que celle des points repères (Frese et al., 2010).

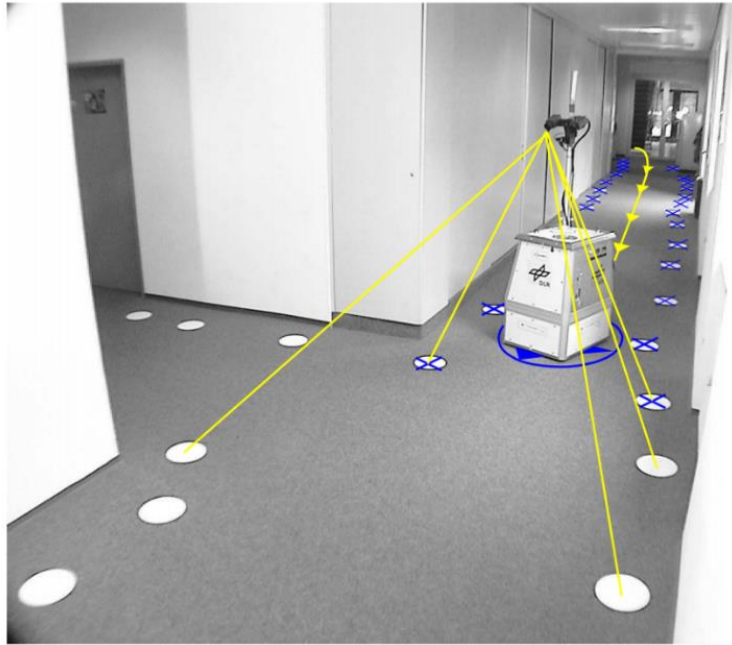


Figure 2.6 Illustration du processus de localisation par les méthodes SLAM (Frese et al., 2010)

Sur la base de la position du mobile, l'acquisition d'un nuage de points de l'environnement est possible. Cependant, le problème de recalage des nuages de points successifs se pose. Dans ce contexte, l'algorithme ICP est utilisé. ICP est un algorithme utilisé pour minimiser la différence entre deux nuages de points (Besl et al., 1992). La minimisation se fait de manière itérative en calculant à chaque fois les matrices de translation et rotation nécessaires pour minimiser une fonction de coût (la distance euclidienne par exemple) entre les deux nuages de points. Cette distance est calculée sur la base des paires de points appariées (Konecny et al., 2016). ICP est utilisé pour le recalage des nuages de points acquis par une plateforme mobile dans le but d'avoir un nuage de points global de l'environnement. Plusieurs variantes d'ICP existent. A titre d'exemple, Vaidis et al. (2020) proposent une variante qui permet de réduire la dérive de la solution donnée par l'algorithme. Cela est possible en introduisant un terme supplémentaire dans la fonction de coût pénalisant la dérive des rotations estimées.

2.4.5. Les techniques de positionnement optique

Il s'agit du groupe de technologies le plus populaire. Ces techniques sont basées sur le traitement des données d'un système de caméras vidéo. Ces techniques se sont très bien développées pendant les dernières années grâce notamment aux avancées dans les techniques de traitement d'images et l'augmentation des capacités de calcul. Selon Mainetti et al. (2014), la localisation peut être réalisée de deux manières :

- En utilisant un système de caméras fixes : dans ce cas, une cible mobile sera localisée sur une ou plusieurs images capturées par les caméras et sa position calculée par rapport aux positions fixes des caméras; et
- En utilisant un système de caméras mobiles: dans ce cas, c'est la cible en mouvement qui sera équipée de caméras et la position est calculée par rapport à des objets dont la localisation exacte est connue.

De plus, Mautz (2012) propose une classification des systèmes de positionnement optique selon la référence utilisée pour le calcul de la position :

- BIM (Building Information Model) comme référence : les objets sont détectés sur les images puis appariés aux objets d'un modèle numérique de bâtiment. La position de ces objets peut donc être déduite à partir du BIM;
- Images comme référence : des images de la zone en question sont prises séquentiellement au début puis comparées à l'image affichée par le mobile équipé d'une caméra. La position peut ensuite être estimée; et
- Cibles de type marqueurs codés comme référence : l'utilisation des marqueurs codés est plus robuste et facilite l'identification des points homologues lors de l'appariement d'images. La Figure 2.7 illustre un exemple des marqueurs utilisés.



Figure 2.7 Exemple de marqueurs utilisés en positionnement optique (Mautz, 2012)

Dans un système de positionnement optique, l'information 3D est obtenue grâce au mouvement des caméras. Ces techniques permettent d'atteindre des incertitudes de l'ordre de 10^{-1} à 10^{-6} m (Mainetti et al., 2014). Ils permettent une large couverture et ne nécessitent pas d'autres matériels à part les caméras (comme l'exigence de porter un badge dans le cas du positionnement infrarouge). Cependant, le déploiement d'un système optique pour la localisation est très onéreux vu qu'il nécessite l'installation d'un grand nombre de caméras de façon à couvrir la zone entière (Mainetti et al., 2014). En outre, l'incertitude du positionnement est très sensible aux conditions d'éclairage (Gu et al., 2009).

2.4.6. Positionnement ultrasonore

Dans un tel système, des ondes ultrasoniques sont utilisées pour mesurer la distance entre des stations fixes et le mobile à localiser en utilisant des récepteurs ultrasoniques synchronisés entre eux (Mainetti et al., 2014). Souvent, il s'agira de balises installées au plafond qui diffusent périodiquement des ondes ultrasonores ainsi que des fréquences radio. La position des balises fixes doit être connue. Le mobile pourra calculer sa position en utilisant le temps d'arrivée de l'onde ainsi que la vitesse du son qui sera corrigée de l'effet de la température (Mautz, 2009). La distance aux balises pourra aussi être calculée en utilisant la différence entre le temps d'arrivée de l'onde ultrasonore et l'onde radio (équation 2.1) (Mautz, 2012).

$$\Delta t = \frac{r}{v_{US}} - \frac{r}{v_{RF}} \quad 2.1$$

r est la distance entre une balise fixe et le mobile, v_{US} est la vitesse du son dans l'air et v_{RF} est la vitesse de la lumière.

Cette méthode est utile lorsqu'on veut éviter la synchronisation entre les balises fixes et le mobile (Mautz, 2012). La vitesse du son est grandement influencée par la température de la manière suivante (équation 2.2) (Mautz, 2012).

$$v_{US} = (331.3 + 0.606 T) \quad 2.2$$

En effet, selon Mainetti et al. (2014), une variation de 1 degré dans la mesure de la température est susceptible de causer une déviation de 2 mm dans la distance. Un système de positionnement ultrasonore contient donc souvent un mécanisme automatique de correction pour tenir compte de la variation de température.

En connaissant au moins 3 distances et les coordonnées 3D des balises fixes, la position 3D du mobile peut être déduite (Mautz, 2009). On distingue entre plusieurs systèmes de positionnement ultrasonore selon les balises utilisées. On cite ci-dessous quelques exemples:

- Les bats actifs : dans un tel système, les utilisateurs disposent de balises appelées bat qui émettent des signaux ultrasonores périodiques qui seront reçus par les récepteurs fixés au plafonds (Koyuncu et al., 2010). Un tel système fournit également des informations de direction (Ward et al., 1997). Les bats sont de petits appareils portés par les utilisateurs ayant une batterie avec une durée de vie de 15 mois (Gu et al., 2009). La Figure 2.8 illustre cette technique. L'incertitude du système est de 2 cm (Mautz, 2012). Cette méthode nécessite le déploiement d'un grand nombre de récepteurs au plafond et peut donc être onéreuse et difficilement extensible. En outre, l'incertitude peut être altérée par la présence d'obstacles entre les balises et les bats;

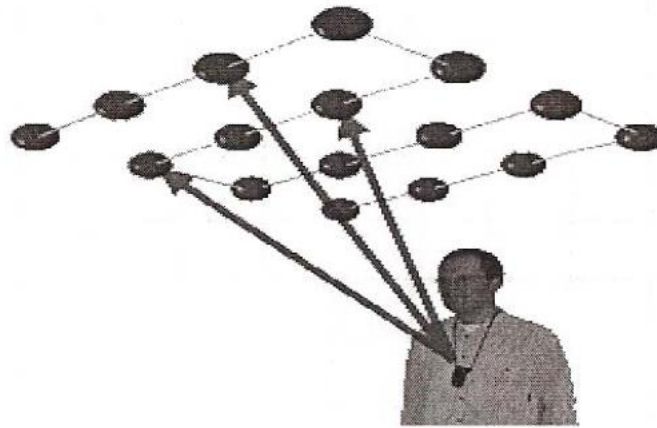


Figure 2.8 Positionnement ultrasonore par bat actifs (Koyuncu et al., 2010)

- Les crickets : Ils permettent d'atteindre une incertitude entre 1 et 2 cm dans une zone de $10 m^3$ (Mautz, 2012). Une unité de crickets contient un émetteur et un récepteur (Koyuncu et al., 2010). Le système est constitué par des émetteurs ultrasonores dont la position est connue et des récepteurs dont la position est inconnue. L'algorithme de positionnement utilisé est celui du calcul du temps d'arrivée.

Durant les dernières années, la compagnie Marvelmind Robotics a mis au point un système de positionnement ultrasonore intérieur offrant une incertitude de 2 cm (Marvelmind, 2020). Amsters et al. (2019) ont mis au point une expérience pour vérifier l'incertitude de 2 cm revendiquée par Marvelmind. Ils ont conduit leurs expériences dans un laboratoire mesurant 5 m sur 5m et ils ont cartographié la trajectoire d'un mobile et l'ont comparé à la vérité terrain. L'incertitude moyenne était de 19,62 mm ce qui est cohérent avec celle de Marvelmind.

En résumé, les systèmes de positionnement ultrasonore ont un coût relativement faible mais présentent certains inconvénients comme l'effet multi-trajet ou encore la grande influence de la température sur les mesures de la distance. Un autre aspect influençant l'incertitude du système ultrasonore est l'incertitude sur les coordonnées des balises fixes : l'incertitude de la position du mobile ne peut pas dépasser celle-ci. Ces coordonnées doivent donc être levées avec le plus grand soin au millimètre près en utilisant les stations totales.

2.4.7. Positionnement infrarouge

L'un des premiers systèmes de positionnement intérieur se basait sur l'utilisation de badges actifs (Koyuncu et al., 2010). Certaines de ces techniques utilisent des systèmes actifs comme des balises et d'autres utilisent des systèmes passifs comme le rayonnement infrarouge naturel ou celui provenant d'une source artificielle.

- Un système actif consiste en un ou plusieurs récepteurs fixés à des positions connues et des émetteurs mobiles dont on ignore la position. Mainetti et al. (2014) donnent l'exemple d'un tel système pour lequel un utilisateur mettant un badge muni d'un ID (Identifiant) unique émet un signal infrarouge à des intervalles réguliers. Ce dernier est détecté par des récepteurs infrarouges dont la position est connue. Ces derniers à leurs tours envoient les informations à un serveur de calcul qui calcule la position de l'utilisateur. Cette position est souvent calculée par l'algorithme de proximité et plus précisément la méthode appelée 'cellule d'origine (Mainetti et al., 2014).
- Un système passif basé sur le rayonnement infrarouge naturel utilise des capteurs qui prennent des images dans la bande infrarouge thermique de l'environnement intérieur. La position peut être calculée par l'algorithme de triangulation suivant la méthode de l'angle d'arrivée (Mautz, 2012). Cependant, l'incertitude d'un tel système peut être affectée par la radiation solaire de fond.
- Un système passif basé sur une source artificielle de rayonnement infrarouge utilise des sources actives qui émettent un rayonnement infrarouge qui sera détecté par des capteurs. L'implémentation se fait souvent soit via des LED (light-emitting diode) ou des retro-rélecteurs (Mautz, 2012).

Les systèmes actifs permettent un positionnement avec une incertitude millimétrique contrairement aux systèmes passifs dont l'estimation de la position demeure grossière. Ces systèmes sont très robustes étant donné l'absence d'interférences comme c'est le cas des ondes radios. Cependant, les erreurs de multi-trajet ont une grande influence sur l'incertitude de la localisation et le coût de déploiement et de maintenance d'un tel système est très onéreux

(Gu et al., 2009). En outre, les systèmes de positionnement infrarouge exigent l'existence d'une ligne de visé.

2.4.8. Positionnement radio

WLAN (Wireless Local Area Network) / WIFI

Dans un réseau WLAN, un nœud peut recevoir et émettre un signal radio d'un routeur sans fil. Ce dernier peut être utilisé pour déterminer la position de n'importe quel appareil avec des fonctions wifi (Mainetti et al., 2014). La méthode WLAN est donc tributaire de l'existence d'un réseau de routeurs connus (Al-Ammar et al., 2014). Le plus souvent, on utilise le RSSI (Received Signal Strength Indicators) comme technique de positionnement WLAN consistant à établir le lien entre ces indicateurs et la position de l'utilisateur en utilisant un modèle de propagation. On peut aussi utiliser une méthode hybride entre le RSSI et le fingerprinting. L'utilisation des méthodes basées sur le temps d'arrivée, la différence du temps d'arrivée ou encore l'angle d'arrivée est moins courante (Al-Ammar et al., 2014). Le positionnement RSSI peut être mené de plusieurs manières (Mautz, 2012) par les méthodes suivantes :

- La méthode de la cellule d'origine qui consiste à connaître les coordonnées du point d'accès auquel le mobile est connecté avec le plus grand RSSI. La position du mobile est ensuite fixée à la position du point d'accès;
- Le positionnement par fingerprinting qui consiste à recueillir des caractéristiques du signal (comme l'intensité du signal RSS) et de les apparier pour déterminer la position de la cible; et
- Le positionnement par triangulation qui consiste à calculer la position du mobile par triangulation des valeurs du RSSI.

L'incertitude du positionnement WLAN varie entre 3 et 30 m (Liu et al., 2007). Celle-ci peut être améliorée en augmentant le nombre de routeurs utilisés pour le positionnement (Mautz, 2012). Le positionnement WLAN est très rentable vu qu'il permet la localisation de n'importe quel appareil WIFI et sans aucune condition sur la ligne de visée vu que les ondes radio ont

la capacité de pénétrer les matériaux solides. Le coût de déploiement d'un tel système est relativement bas vu qu'il reprend l'infrastructure WLAN déjà existante. Cependant, les ondes radios sont atténuées par les multiples obstacles existants dans un environnement intérieur. Le positionnement WLAN pose aussi le problème du chevauchement entre les points d'accès (Gu et al., 2009). En outre, la consommation d'énergie pour un tel système est importante.

RFID (Radio Frequency Identification)

Dans un système de positionnement RFID, on retrouve des lecteurs RFID équipés d'antennes ainsi qu'un système d'émetteurs récepteurs basé sur les fréquences radio (Koyuncu et al., 2010). La Figure 2.9 illustre comment un système de positionnement RFID opère. Les émetteurs récepteurs peuvent être soit actifs et ainsi transmettre un signal ou passifs et alors nécessiter une source externe pour la transmission (Mainetti et al., 2014). Ainsi, les données sont transmises à partir des émetteurs récepteurs vers le lecteur RFID. Il existe deux méthodes principales de positionnement RFID :

- La méthode CoO cellule d'origine qui se base sur la présence d'émetteurs récepteurs à proximité; et
- La méthode RSSI qui consiste en l'utilisation des RSSI pour mesurer la distance entre les émetteurs et les récepteurs par triangulation.

RFID permet d'atteindre des incertitudes entre 1 et 2 m (Popović, 2021). De plus, ce système agit rapidement dans le calcul de position (Koyuncu et al., 2010). La technique RFID ne nécessite pas la présence d'une ligne de visée comme les systèmes WLAN. Elle se caractérise également par un haut débit de données et une sécurité élevée. Cependant, et comme il s'agit d'ondes radio, la puissance du signal peut être fortement diminuée par les obstacles présents. De plus, pour la méthode des cellules d'origine, l'incertitude du positionnement est étroitement liée au nombre d'émetteurs récepteurs présents dans l'environnement intérieur.

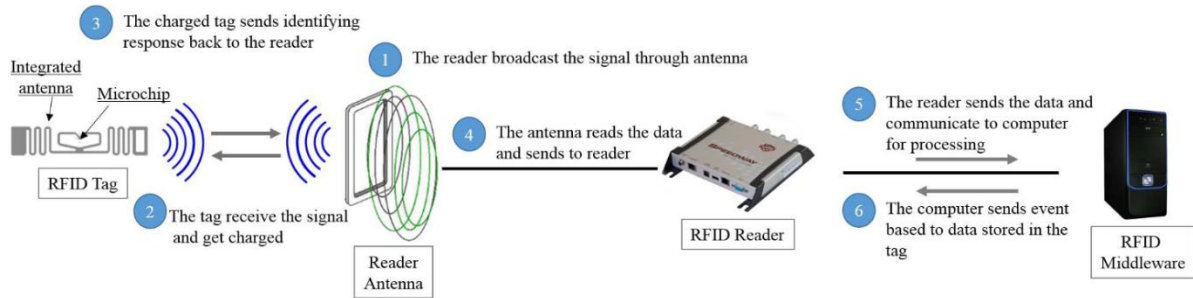


Figure 2.9 Principe de fonctionnement de la méthode RFID (Mainetti et al., 2014)

UWB (Ultra-Wideband)

Dans un tel système, des ondes radio ultralarge à impulsion (UWB) sont utilisées. Le système est composé d'un générateur d'ondes radio et d'un réseau de récepteurs. Le temps d'arrivée des signaux impulsionnels est ensuite estimé. Les ondes UWB occupent une bande de fréquence large faisant que cette technique est plus résistante à l'effet multi-trajet (Mautz, 2012). La Figure 2.10 illustre le principe du positionnement UWB. L'émetteur émet une onde UWB et quatre récepteurs fixés à des positions connues la détectent. Le réseau d'horloges fournit la référence pour la synchronisation des récepteurs alors que le réseau de données sert pour l'échange de données entre les récepteurs et l'ordinateur de calcul (Koyuncu et al., 2010).

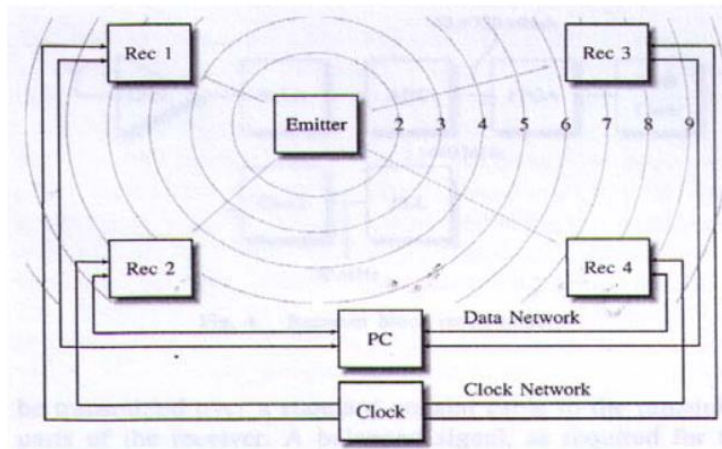


Figure 2.10 Le principe de la technique UWB (Merz et al., 2008)

L'avantage du positionnement UWB par rapport au positionnement RFID est la transmission d'un signal simultanément sur plusieurs bandes de fréquences et sur une durée courte et la faible quantité d'énergie consommée par les récepteurs UWB (Gu et al., 2009). Ces

impulsions rapides et la large bande passante permettent une détermination précise du temps d'arrivée et ainsi la distance et permettent aussi d'isoler les signaux résultants du multi-trajet (Gu et al., 2009). Le positionnement UWB est très précis. En effet, pour une large bande passante d'une centaine de Mhz, il est possible d'atteindre des incertitudes centimétriques (Mautz, 2012).

2.4.9. Positionnement Bluetooth

Les systèmes de positionnement Bluetooth opèrent dans la bande ISM 2,45 GHz. Le système se base sur l'utilisation de petits émetteurs récepteurs. Chacun a un identifiant unique pouvant être utilisé pour le localiser (Liu et al., 2007). En comparaison au WLAN, le positionnement Bluetooth a un débit binaire brute moins important et une portée entre 5 et 10 m (Al-Amman et al., 2014). Celle-ci peut varier selon les conditions de ligne de visée et la configuration des antennes (Mautz, 2012). L'algorithme de positionnement utilisé pour le Bluetooth est celui de la cellule d'origine. L'utilisation d'un tel système peut s'avérer rentable étant donné qu'il permet l'utilisation d'un grand nombre d'appareils déjà équipés de Bluetooth. Le coût de déploiement est donc faible et la consommation d'énergie l'est aussi contrairement à d'autres systèmes comme le WLAN. Cependant, la portée de lecture est petite par rapport à d'autres technologies.

2.5. Les indicateurs de performance d'un système de positionnement intérieur

Pour concevoir un système de positionnement intérieur, il est impératif de bien comprendre les indicateurs de performance existants en fonction de l'application pour laquelle on désire mettre en place le système de positionnement. En effet, tous les indicateurs de performance doivent être pris en compte pour trouver un bon compromis. Pour évaluer la performance d'un système de positionnement, l'incertitude n'est souvent pas suffisante et ne doit pas être la seule mesure sur la base de laquelle on choisit une technologie de positionnement. Liu et al. (2007) proposent 6 indicateurs de performance : exactitude, incertitude, complexité, scalabilité, robustesse et coût. Al-Amman et al. (2014) en proposent 6 autres : exactitude, disponibilité, couverture, scalabilité, coût et discrétion. Dans Gu et al. (2009), 8 indicateurs

de performance sont proposés : sécurité et discrétion, coût, performance, robustesse et tolérance aux pannes, complexité, préférence de l'utilisateur, disponibilité commerciale et limitations. Mautz (2012) proposent une liste plus exhaustive de mesure de performance (Figure 2.11).

Dans ce qui suit, nous allons compiler et détailler tous les indicateurs proposés par les différents auteurs.



Figure 2.11 Indicateurs de performance d'un système de positionnement intérieur proposé par (Mautz, 2012)

L'exactitude (accuracy)

Il s'agit du plus important indicateur de performance. Elle est souvent calculée comme étant l'erreur moyenne quadratique sur la distance, i.e. entre les distances estimées et les distances réelles. Al-Ammar et al. (2014) la définissent comme la distance euclidienne moyenne entre la position estimée et la position vraie. Dans (Mautz, 2012), l'auteur fournit plus de détails sur cette métrique. Il s'agit du degré de conformité entre la position mesurée et la position vraie, pour les deux composantes verticales et horizontales, à un niveau de confiance de 95%. L'exactitude d'un système comprend plusieurs composantes dont un biais systématique d'où l'importance de modéliser les erreurs et apporter les corrections aux observations. Dans ce

cas et pour une distribution normale, elle peut être calculée comme étant la déviation standard (équation 2.3).

$$\sigma_P = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\widehat{P}_i - P_i)^2} \quad 2.3$$

Où n est le nombre d'observations, \widehat{P}_i est le vecteur de position vrai et P_i est le vecteur de position prédit. Plus l'exactitude est petite, mieux est le système de positionnement. Cependant, un compromis existe souvent entre l'exactitude et les autres métriques de performance et elle doit donc être examinée à la lumière de celles-ci. Mautz (2012) considère qu'un système est dit de faible exactitude si $\sigma_P > 10 \text{ m}$ et de grande exactitude si $\sigma_P < 1 \text{ cm}$.

L'incertitude (precision)

Tandis que l'exactitude détermine à quel point les mesures sont proches de la valeur réelle, l'incertitude permet de savoir à quel degré les mesures sont proches les unes des autres. En d'autres mots, il s'agit d'une mesure de la cohérence et de la robustesse du système de positionnement. Gu et al. (2009) définissent l'incertitude comme étant la probabilité de bien estimer la position par rapport à une exactitude prédéfinie. Une autre méthode pour obtenir l'incertitude d'un système de positionnement est l'utilisation de la fonction de densité de probabilité cumulée de l'erreur sur la distance (Liu et al., 2007). Ainsi, un système avec une fonction de densité parvenant à des probabilités maximales rapidement sera très précis vu que la majorité des erreurs de distance auront de petites valeurs. Le terme incertitude est préféré au terme précision par soucis de cohérence avec le vocabulaire international de métrologie (JCGM., 2012). Ce dernier la définit comme étant le paramètre non négatif qui caractérise la dispersion des valeurs attribuées à un mesurande (grandeur que l'on veut mesurer), à partir des informations utilisées.

La complexité (complexity)

La complexité d'un système de positionnement est définie par rapport aux matériels et logiciels auxquels il fait appel (Liu et al., 2007). Un autre aspect de complexité est lié aux

efforts de mise en place et de maintenance du système (Gu et al., 2009). Il faut ainsi privilégier des systèmes avec des configurations rapides et des logiciels de traitement facilement utilisables. Le temps de calcul est un autre facteur de complexité qu'il faut prendre en considération. Le calcul de position sera plus rapide s'il est mené sur un serveur de calcul central plutôt que du côté de l'utilisateur/cible à positionner.

La robustesse (robustness)

Un système de positionnement est dit robuste s'il est capable de fonctionner même en cas de défectuosité comme l'absence de signaux par exemple, ou le déchargement d'une batterie. Dans un tel scénario, la technique de positionnement doit être capable d'utiliser les données qu'elle a pour calculer une position.

La scalabilité (scalability)

La scalabilité d'un système de positionnement dénote sa capacité à fournir des positions en cas d'augmentation de l'étendue de la zone géographique ou le nombre d'utilisateurs (Al-Ammar et al., 2014). On parle aussi de densité définie comme étant le nombre d'unités (utilisateurs) par unité de surface par période. Dans ce cas, le système sera capable de localiser des objets dans diverses situations géographiques : au niveau d'un pays, d'une ville ou d'un bâtiment. Il sera aussi capable de calculer les positions même dans un espace encombré.

Le coût (cost)

L'indicateur coût peut être envisagé selon plusieurs dimensions comme l'argent, le temps, l'espace, le poids ou encore l'énergie (Liu et al., 2007). Sur la dimension temporelle, le coût peut être évalué en terme du temps nécessaire pour la mise en place du système de positionnement. Sur la dimension spatiale, il s'agit de la taille des composantes matérielles et combien d'espace elles occupent. Son importance devient apparente dans le cas des systèmes de positionnement nécessitant un appareil du côté de l'utilisateur ou la cible. Le coût renferme également le coût des différentes composantes de l'infrastructure, le coût de l'appareil de positionnement et le coût pour la mise en place du système de positionnement et de sa

maintenance (Gu et al., 2009) . Ainsi, les méthodes de positionnement qui reprennent une architecture déjà existante comme le Bluetooth ou le WLAN sont plus économiques. Un autre aspect du facteur coût est lié à la consommation d'énergie. Pour les applications où le coût est important, il faut privilégier les méthodes de positionnement utilisant des appareils passifs sans batterie.

Disponibilité (availability)

Il s'agit de la durée de temps durant laquelle le système de positionnement peut fonctionner avec l'incertitude requise (Mautz, 2012). Al-Amr et al. (2014) définissent trois niveaux de disponibilité:

- Faible disponibilité : inférieure à 95% ;
- Disponibilité régulière : supérieure à 99% ; et
- Haute disponibilité : supérieure à 99.9% ;

Gu et al. (2009) définissent une autre composante de la disponibilité appelée la disponibilité commerciale en distinguant entre les systèmes de positionnement commerciaux disponibles sur le marché et les systèmes développés dans des laboratoires de recherche.

Couverture (coverage area)

Il s'agit du périmètre couvert par le système et qui varie d'une technologie à une autre. À l'intérieur de ce périmètre, la performance de positionnement doit être atteinte (Mautz, 2012). On distingue ainsi entre une couverture locale où la taille de la zone est connue et petite (bâtiment par exemple), une couverture extensive où le système est capable d'accroître son périmètre de couverture souvent par l'utilisation d'un grand nombre d'appareils et finalement une couverture globale comme c'est le cas du système GNSS.

Discrétion et sécurité (privacy and security)

La problématique d'utilisation des données tierces est devenue une réelle préoccupation ces dernières années. Ainsi, il faut contrôler l'accès aux données de localisation des utilisateurs

et leur distribution (Gu et al., 2009). À cette fin, un système de positionnement doit être muni de mécanismes de sécurité contre le vol et l'utilisation abusive des données.

Autres indicateurs

Mautz (2012) définit d'autres indicateurs de performance :

- Taux de mise à jour : la fréquence avec laquelle les positions sont calculées. On distingue un taux périodique où les positions sont calculées automatiquement à des intervalles de temps réguliers. Il existe aussi des systèmes sur demande où le calcul se fait à la demande de l'utilisateur et des systèmes où le calcul est déclenché par un phénomène spécifique; et
- Latence du système : il s'agit de l'attente observée par l'utilisateur pour avoir les informations sur sa position. Le plus difficile est d'avoir un système fonctionnant en temps réel.

2.6. Comparaison entre les techniques de positionnement intérieur

Contrairement au positionnement extérieur où le GNSS est la solution de mise pour le calcul de position, les systèmes de positionnement intérieur sont très divers et il n'existe pas encore de solution unique. Le choix de la méthode et de l'algorithme de positionnement doit donc se faire en ayant l'application finale en tête et en privilégiant les indicateurs de performance les plus pertinents vu le compromis qui existe entre eux. Ainsi, si pour une application donnée, l'incertitude et le coût sont importants, un système de positionnement ultrasonore est à privilégier (Koyuncu et al., 2010). Le Tableau 2.1 compare les techniques de positionnement intérieur en fonction des différents indicateurs de performance.

L'une des méthodes utilisées pour pallier les insuffisances des méthodes existantes de positionnement intérieur est de les fusionner. L'intégration du RFID avec des capteurs infrarouges ou ultrasonores produit de plus petites incertitudes. L'intégration de la technologie RFID est aussi possible avec une centrale inertielle (Peng et al., 2011). Cela

permet d'avoir de meilleurs résultats vu que la centrale inertielle n'est pas affectée par les erreurs liées à la propagation des ondes radio comme le multi trajet ou l'atténuation d'intensité (Koyuncu et al., 2010). L'incertitude de la technique WLAN peut également être améliorée en intégrant d'autres types de capteurs (Mainetti et al., 2014) ou même une centrale inertielle (Lyu-Han Chen et al., 2014). Yao et al. (2017) ont proposé une méthode de fusion basée sur un filtre Kalman étendu entre la technique UWB et une unité de mesure inertielle. Ils ont obtenu une amélioration de plus de 100% dans la performance de localisation par rapport à l'utilisation de la technique UWB uniquement

Tableau 2.1 Comparaison entre les techniques de positionnement intérieur, adaptée de (Mainetti et al., 2014)

		Indicateurs de performance			
		Ordre de précision	Couverture (m)	Coût	Complexité
Techniques de positionnement	Vision	Millimétrique	1-10	Élevé	Élevée
	Infrarouge	Centimétrique	1-5	Moyen/Élevé	Faible
	Ultrasonore	Centimétrique	2-10	Moyen	Faible
	WiFi	Métrique	20-50	Moyen/Faible	Faible
	RFID	Décimétrique	1-10	Faible	Faible
	Bluetooth	Métrique	1-13	Faible	Faible

2.7. Conclusion

Ce chapitre a présenté de près les défis, le principe et les algorithmes de positionnement intérieur ainsi que les différentes techniques de positionnement. Il nous a également permis de connaître les différents indicateurs qui sont utilisés pour évaluer un système de positionnement intérieur et éventuellement les comparer.

Le prochain chapitre aborde plus en détail le système de positionnement sélectionné dans notre projet de recherche et propose également des expérimentations pour évaluer la qualité de ses données dans un espace intérieur.

Chapitre 3 : Amélioration du positionnement d'un système Lidar dans un espace intérieur : méthodologie proposée, expérimentations, résultats obtenus et analyse

3.1. Introduction

Après la revue des technologies de positionnement intérieur existantes, le présent chapitre porte sur la méthodologie adoptée. On commence par faire une analyse comparative entre les différentes technologies de positionnement dans le but d'en choisir une qui réponde à nos besoins. Ensuite, on fournit une description des différentes expérimentations mises en place pour évaluer la qualité des données produites par la technologie choisie. Finalement, les résultats des différentes expérimentations sont présentés et analysés.

3.2. Choix de la technologie de positionnement intérieur

Au chapitre précédent, le tableau 2.1 a présenté une comparaison entre différentes techniques de positionnement intérieur en fonction des paramètres suivants : ordre de précision, couverture, coût et complexité. Les méthodes basées sur la trilatération ultrasonore semblent présenter un compromis entre précision et coût grâce à leur incertitude centimétrique et leur coût de déploiement faible. De plus, la complexité de ces systèmes demeure raisonnable contrairement aux méthodes basées sur la vision par ordinateur par exemple, qui exige un coût et une complexité élevés afin d'atteindre une précision millimétrique. Le positionnement ultrasonore offre donc un bon compromis entre incertitude, couverture, coût et complexité. Notons que pour les techniques de vision et infrarouge, en dépit de leur faible incertitude, le coût de déploiement reste élevé par rapport aux autres technologies. Notre choix s'est donc porté sur les techniques basées sur la trilatération ultrasonore.

Pour la mise en place d'un tel système, plusieurs solutions commerciales existent dont celle proposée par Marvelmind Robotics. Une description détaillée du système est fournie dans la section suivante.

3.3. Description du système de trilatération ultrasonore Marvelmind

Le système de positionnement Marvelmind consiste en un réseau de balises fixes communiquant entre elles, un ou plusieurs balises mobiles installées sur les objets à positionner et un routeur de calcul (Marvelmind, 2020). Le système utilise le positionnement ultrasonore pour déterminer la position d'un ou plusieurs mobiles. Le calcul de la position se fait par la technique de trilatération en calculant le temps d'arrivée du signal émis entre les balises fixes et les balises mobiles. La fréquence de mise à jour est élevée et peut aller jusqu'à 16 Hz (Amsters et al., 2019). La navigation intérieure basée sur le système Marvelmind peut être déployée selon deux architectures : une architecture non inverse (NIA) et une architecture inverse (IA) (Marvelmind, 2020). Dans la première (NIA), 3 balises fixes doivent être présentes au minimum pour recevoir l'onde ultrasonore en provenance de la balise mobile alors que dans la deuxième (IA), au moins 3 balises fixes doivent émettre des ondes ultrasonores vers une balise mobile. L'architecture NIA est généralement adoptée quand la balise mobile est montée sur une plateforme susceptible d'introduire le bruit dans sa position alors que les balises fixes se trouvent dans des emplacements stable (mur, plafond, etc.). La configuration NIA est donc plus adaptée à notre situation et sera donc utilisée. Le kit de démarrage de l'architecture non inverse de Marvelmind contient :

- 5 super balises : il s'agit de capteurs de positionnement ultrasonores. Chaque balise peut être utilisée comme récepteur ou émetteur selon le mode d'utilisation désirée. (Figure 3.1)



Figure 3.1 Le kit de démarrage de Marvelmind (architecture non inverse) (Marvelmind, 2020)

- 1 routeur : il permet de calculer la position d'une balise mobile. Cela est possible à travers un canal de communication radio avec ces balises. Les positions calculées sont ensuite transférées au logiciel de visualisation / tableau de bord (Figure 3.2).

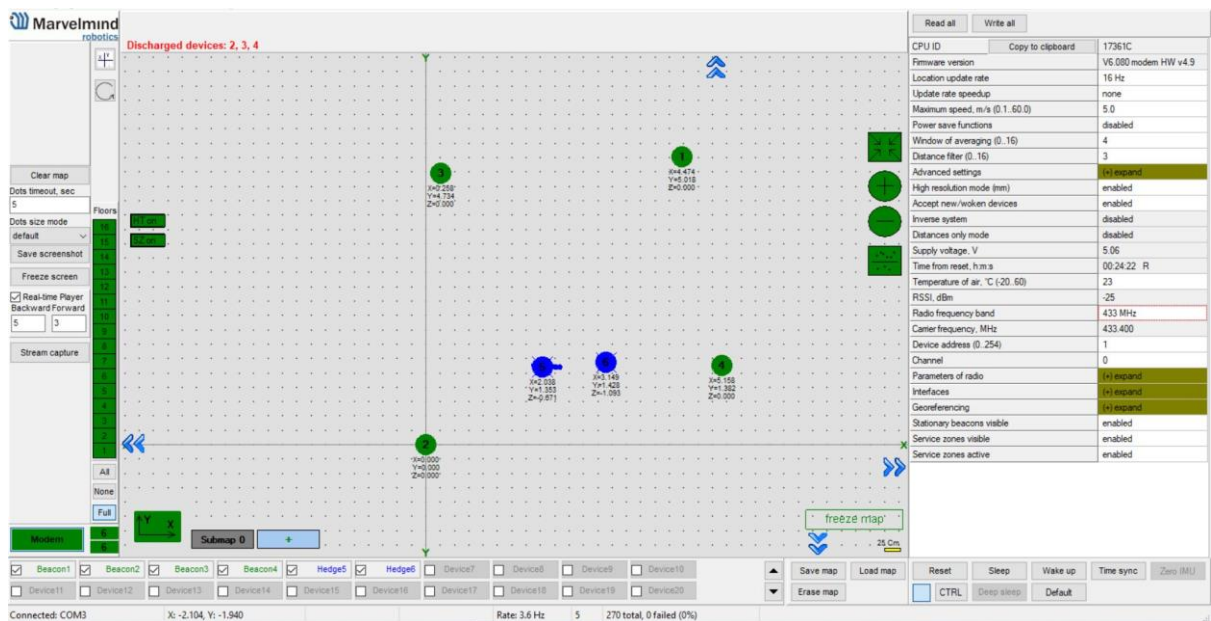


Figure 3.2 Interface du tableau de bord (Dashboard) du logiciel Marvelmind (Marvelmind, 2020). Les points verts représentent les balise fixes et les points bleus représentent différentes positions de la balise mobile

Par la suite, on choisit parmi les super balises celles qui seront fixes et celles qui seront mobiles. Les balises fixes seront installées sur les murs ou le plafond alors qu'une balise mobile sera montée sur une plateforme en mouvement (ex. : un robot). Cette configuration nécessite une vue dégagée entre la balise mobile et un minimum de trois balises fixes

simultanément. La distance entre les balises fixes ne doit pas dépasser 30 m. La configuration minimale pour assurer l'incertitude de 2 cm annoncée (Marvelmind, 2020) est:

- Pour un positionnement 3D : avoir une ligne de visée entre la balise mobile et un minimum de 3 balises fixes dans un périmètre de 30 m;
- Pour un positionnement 2D: avoir une ligne de visée entre la balise mobile et un minimum de 2 balises fixes dans un périmètre de 30 m.

Si on dispose de plus de 4 balises fixes, il faut définir un ensemble de sous-cartes (submaps) dans le tableau de bord avant de démarrer le positionnement par le système Marvelmind. Une sous-carte, également appelée zone de service, est délimité par 4 balises fixes. Tant que la balise mobile est à l'intérieur de cette zone, les 4 balises fixes seront utilisées pour son positionnement. Si la balise mobile quitte une zone de service, elle doit chercher une autre sous-carte pour calculer sa position.

3.4. Méthodologie adoptée

La méthodologie adoptée est représentée par un diagramme descriptif au niveau de la Figure 3.3. Nous avons commencé par une évaluation du système de positionnement Marvelmind au moyen de plusieurs expériences. Ensuite, nous avons procédé à l'intégration de celui-ci avec un système LiDAR mobile intérieur. Finalement, nous avons effectué une première acquisition avec le système intégré dans le laboratoire de métrologie. Le résultat de cette acquisition a été ensuite analysé et comparé avec un nuage de points de référence acquis par le scanner LiDAR 3D statique FARO Focus X130. Les étapes méthodologiques de l'intégration ainsi que les résultats obtenus sont détaillées au chapitre 4.

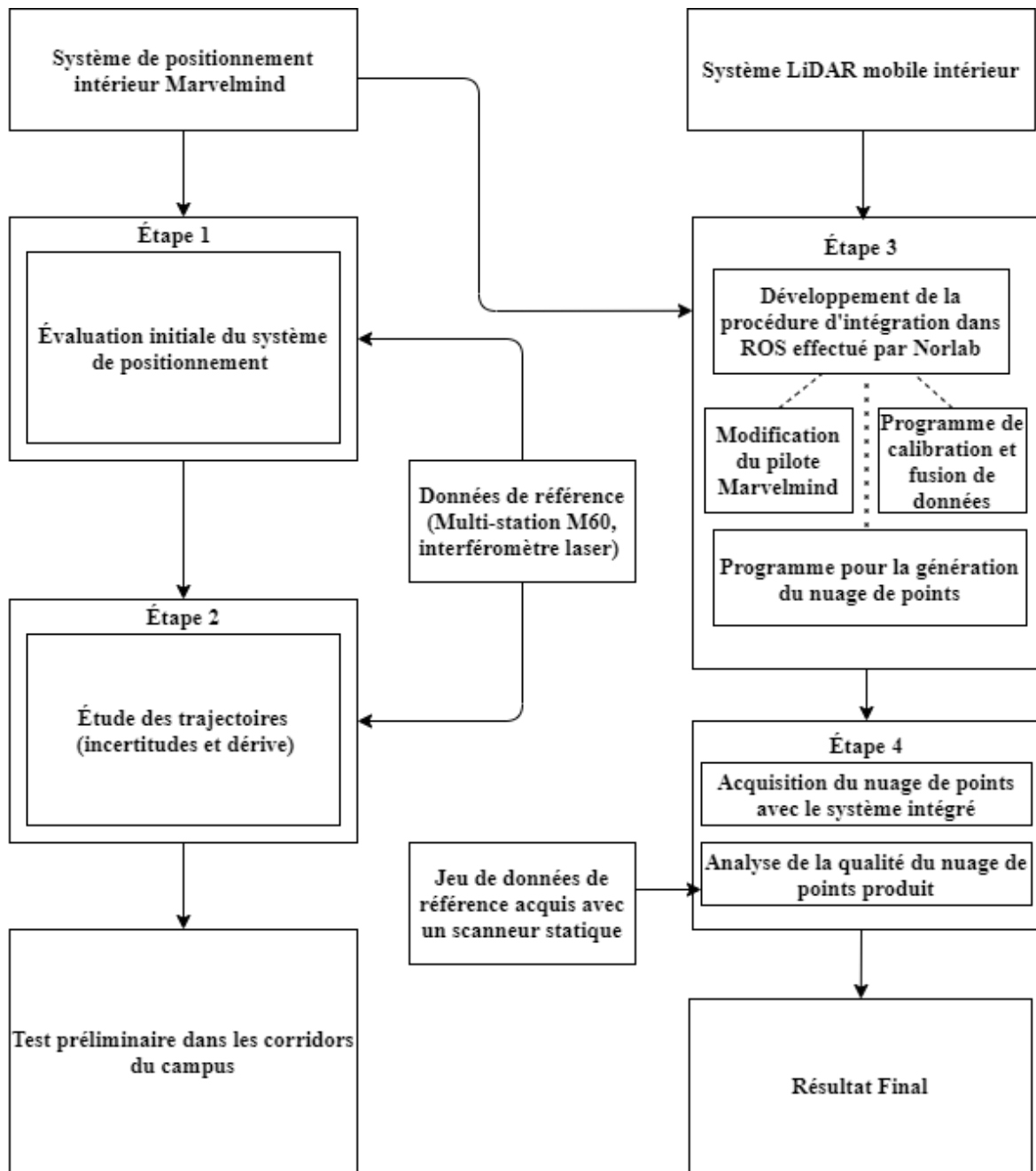


Figure 3.3 Diagramme descriptif de la méthodologie adoptée

3.5. Évaluation initiale du système de positionnement Marvelmind

L'objectif est d'étudier la qualité de positionnement du système. Pour cela, plusieurs expérimentations ont été mises en place. Avant de les détailler, on fournit une description du matériel utilisé :

- Le kit de démarrage Marvelmind décrit précédemment avec 4 balises fixes, une balise mobile et un routeur (Figure 3.1);
- Un interféromètre laser et rail utilisé comme outil de mesure des distances de référence (Figure 3.4); et
- La multi-station Leica MS60 utilisée pour géoréférencer les balises fixes et faire la poursuite automatique du mobile (Figure 3.5).



Figure 3.4 Interféromètre laser du Laboratoire de métrologie



Figure 3.5 La multi-station Leica MS60

Avant de détailler les expériences mises en place, il convient de signaler que seules les coordonnées 2D seront utilisées pour la comparaison. En effet, suite à une série de tests préliminaires, nous n'avons pas été en mesure d'obtenir une coordonnée Z fiable au moyen du système Marvelmind. Les expérimentations mises en place sont décrites dans les prochaines sections.

3.5.1. La mesure de distances entre 4 balises fixes en mode statique avec le système de positionnement Marvelmind

Expérimentation

Avant d'utiliser le système dans son intégralité, on commence par évaluer la qualité des distances calculées par l'une de ces composantes, à savoir les balises fixes. Les 4 balises fixes ont été placées à une hauteur d'environ 2 m à l'intérieur d'un rectangle de 25 m de long par 9m de large afin de s'assurer que les conditions de laboratoire pour l'utilisation du système de positionnement Marvelmind soient respectées (Figure 3.6). Ensuite, la connexion entre les balises et le routeur est établie sur le tableau de bord. Plusieurs paramètres sont aussi transmis au tableau de bord comme la température et la fréquence ultrasonique.

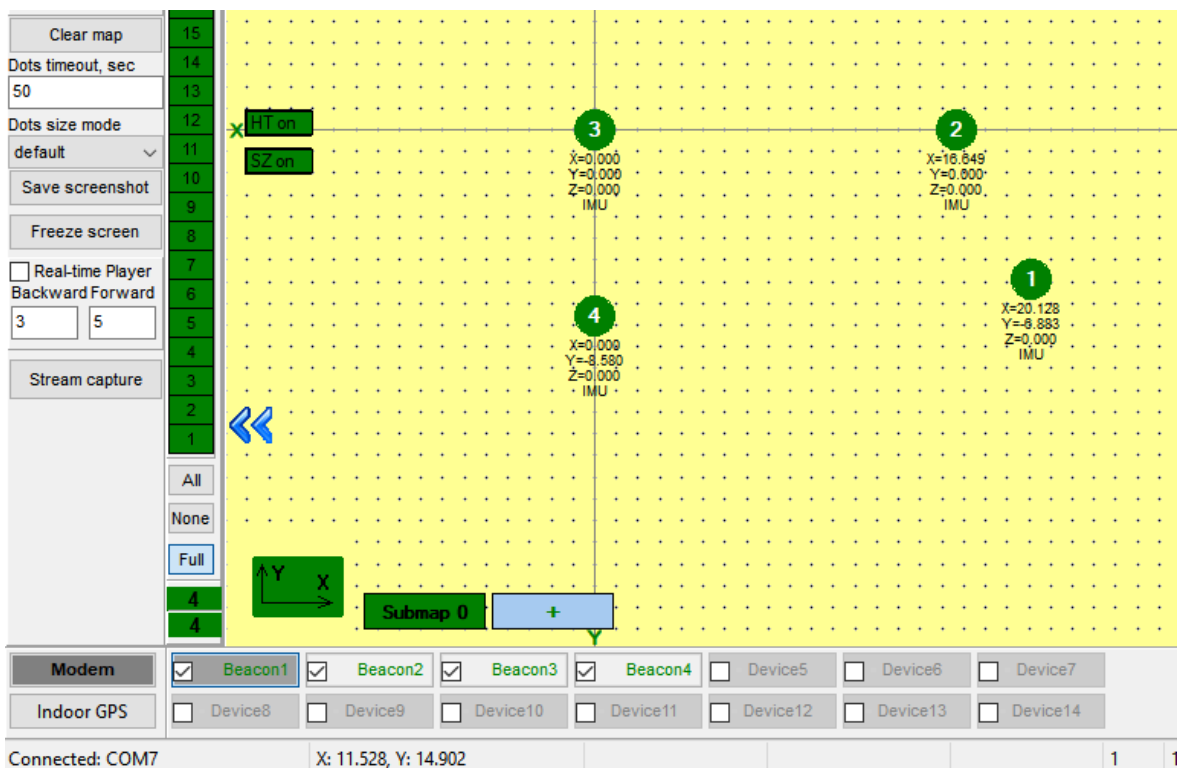


Figure 3.6 Configuration géométrique des 4 balises fixes au sein du laboratoire de métrologie

L'étape suivante concerne le géoréférencement des balises fixes dans un système local connu orienté vers une référence au fond du laboratoire de métrologie. En effet, le système Marvelmind n'est capable de fournir la position du mobile que dans un système local

arbitraire. Le géoréférencement des balises fixes est donc nécessaire pour pouvoir les référencer dans un système de coordonnées locales précis et faire des comparaisons par la suite. Afin de créer ce système local précis, nous avons stationné un point près du centre du laboratoire avec la multi-station MS60 en s'assurant de l'inter-visibilité avec nos balises fixes et la quasi-totalité de notre site d'observation pour avoir un maximum de liberté par rapport aux expériences ultérieures.

Résultats

Le Tableau 3.1 résume les résultats obtenus. d_{ij} est la distance entre les balises fixes i et j . Cette distance est mesurée par le système Marvelmind avant et après géoréférencement des balises fixes puis comparée à la distance donnée par la multi-station. La valeur absolue des différences entre les distances avant et après géoréférencement est calculée pour s'assurer que les coordonnées issues du géoréférencement sont effectivement bien exploitées par les balises. D_1 et D_2 sont les distances mesurées par Marvelmind respectivement avant et après géoréférencement des balises. D_3 est la distance mesurée avec la multi-station. La valeur absolue de la différence entre les résultats donnés par la multi-station et le système Marvelmind avant géoréférencement est également calculée pour étudier la qualité des mesures du système. On calcule aussi la moyenne des différences et leurs écarts type.

Tableau 3.1 Résultats obtenus pour la comparaison de distances entre les balises fixes sous différentes conditions

Distance entre les balises fixes	D_1 (m) avant géo-référencement	D_2 (m) après géo-référencement	D_3 (m) avec la multi-station	$ D_1 - D_2 $ (cm)	$ D_2 - D_3 $ (cm)
d_{12}	7.712	7.659	7.659	5,3	0.0
d_{13}	21.272	21.249	21.248	2,3	0.1
d_{14}	20.199	20.220	20.222	2,1	0.2
d_{23}	16.649	16.630	16.629	1,9	0.1
d_{24}	18.729	18.706	18.706	2,3	0.0
d_{34}	8.580	8.520	8.520	6,0	0.0
			Écart moyen (cm)	3.3	0.1
			Écart type (cm)	1.8	0.1

Analyse

Suite à cette expérimentation, on remarque que parmi les différentes combinaisons de paires de points, l'écart moyen des distances mesurées avant le géoréférencement des balises fixes est de 3.3 cm avec un écart type de 1.8 cm. On remarque également que cet écart devient plus important pour certaines paires de balises (à savoir d_{12} et d_{34}). D'après la configuration géométrique de la Figure 3.6, on peut clairement voir que ces paires de balises sont disposées selon l'axe des Y et que par conséquent, la composante Y est plus importante dans le calcul de distance. De plus, on remarque également que les distances qui présentent l'écart minimal sont celles calculées entre des balises disposées selon l'axe des X (à savoir d_{23} et d_{14}). Donc plus la composante Y est importante dans la distance, plus l'écart du système augmente. Nous pourrions vérifier ce constat suite aux autres expérimentations vers la fin de ce chapitre.

Globalement, la différence des distances entre les balises avant géoréférencement peut atteindre jusqu'à 6 cm. Après géoréférencement, cette différence entre les distances données par Marvelmind et celles données par la multi-station est réduite à 1 mm. Ce résultat montre que le géoréférencement est effectivement exploité par le système Marvelmind et permet d'améliorer la précision en réduisant l'incertitude des distances calculées entre les cibles par le système Marvelmind.

3.5.2. La mesure de distances entre deux points consécutifs d'une balise mobile espacés de 2m par le système de positionnement Marvelmind avant géoréférencement

Expérimentation

L'objectif est d'étudier la qualité de la position donnée par la balise mobile avant le géoréférencement des balises fixes. La balise mobile a été placée sur le rail du Laboratoire de métrologie afin de comparer les déplacements du mobile avec l'interféromètre (Figure 3.7). Ensuite, la balise est déplacée de 2 m précisément (au μm) au moyen des observations fournies par l'interféromètre. À chaque position, la balise mobile effectue une série d'observations pendant quelques secondes à une fréquence de 8 Hz. La moyenne d'un minimum de 10 observations est utilisée pour calculer les coordonnées X et Y de la balise mobile.

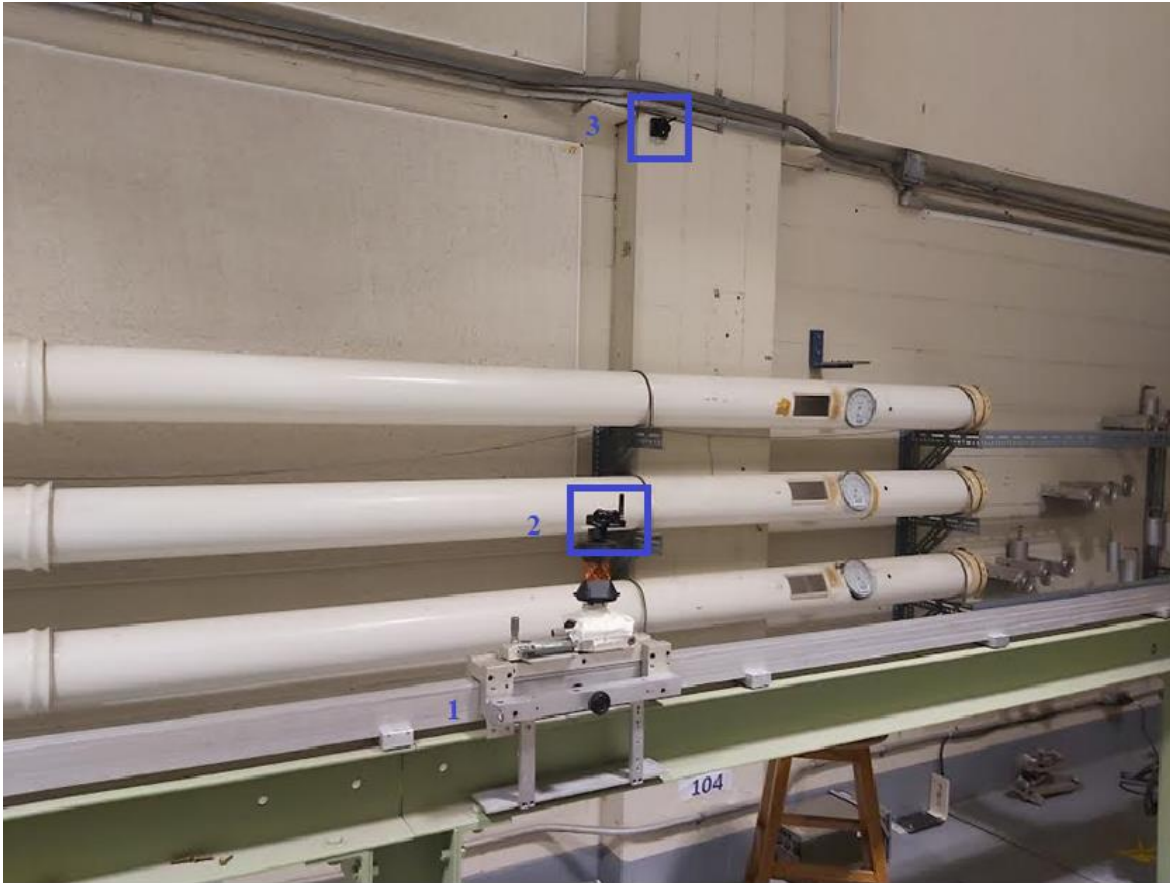


Figure 3.7 Configuration de l'expérimentation (1: rail, 2: balise mobile, 3: balise fixe).

La configuration géométrique des balises fixes par rapport au rail est illustrée dans la Figure 3.8

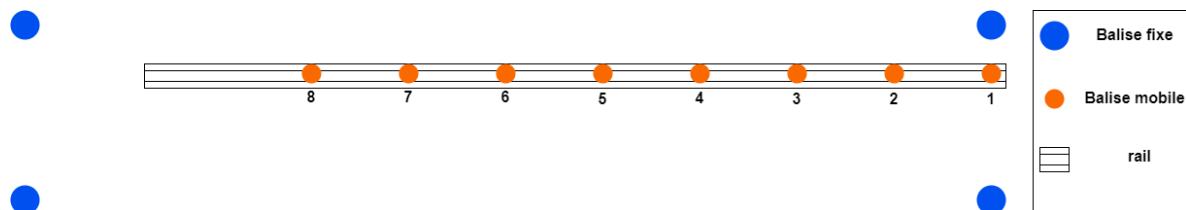


Figure 3.8 Configuration géométrique du rail par rapport aux balises fixe

Résultats

Le Tableau 3.2 montre les résultats de l'expérience décrite plus haut. X_{mobile} et Y_{mobile} sont les coordonnées de la balise mobile produite par la technologie Marvelmind avant le géoréférencement des balises fixes. Δ_1 et Δ_2 sont les déplacements entre deux points

consécutifs donnés respectivement par le système Marvelmind et par l'interféromètre. La valeur absolue des différences entre ces deux déplacements est calculée pour vérifier s'il y a une dérive entre les deux méthodes.

Tableau 3.2 Comparaison entre les distances horizontales obtenues pour 8 points espacés de 2 m par le système Marvelmind et l'interféromètre laser avant géoréférencement des balises fixes

Points	X_{mobile} (m)	Y_{mobile} (m)	Δ_1 (m) Déplacements par le système Marvelmind	Δ_2 (m) Déplacements par l'interféromètre	$ \Delta_1 - \Delta_2 $ (cm)
1 (0m)	17.793	0.413	0.000	0.000	0
2 (2m)	15.992	-0.481	2.010	2.000	1.0
3 (4m)	14.224	-1.395	1.991	2.000	0.9
4 (6m)	12.407	-2.376	2.065	2.000	6.5
5 (8m)	10.652	-3.206	1.941	2.000	5.9
6 (10m)	8.862	-4.136	2.017	2.000	1.7
7 (12m)	7.076	-4.986	1.978	2.000	2.2
8 (14m)	5.304	-5.905	1.996	2.000	0.4
				Écart moyen (cm)	2.3
				Écart-type (cm)	2.5

Analyse

Suite à cette expérimentation, on remarque que les différences sont de 2.3 cm en moyenne avec une valeur maximale de 6.5 cm. Cependant, l'écart type de ces différences est de 2.5 cm dû à l'écart important observé au niveau de certains points. En effet, à 6 m de distance du point de départ, l'écart atteint 6.5 cm. Cela est dû à la disposition des balises fixes par rapport au rail (Figure 3.8). En effet, au début du déplacement le long du rail (point 1 jusqu'au point 3), la balise mobile est très proche de deux balises fixes. À mi-parcours (point 4 et point 5), les distances entre les balises fixes et la balise mobile sont maximales. À la fin du déplacement, la balise mobile se retrouve de nouveau proche de deux balises fixes. Plus la

distance entre le mobile et les balises fixes est grande, plus son incertitude augmente. Cela explique l'écart important observé à mi-parcours sur les points 4 et 5.

Sur la base de ces résultats et ceux de la section 3.5.1, on peut conclure que l'incertitude du système global, à savoir celui consistant à utiliser les balises fixes et mobile est d'un ordre centimétrique. Ces résultats, écart moyen de 3.3 cm (Tableau 3.1) et de 2.3 cm (Tableau 3.2), sont légèrement inférieurs, donc de moins bonne qualité, que ceux publiés dans les spécifications techniques du concepteur de la technologie Marvelmind qui est de 2 cm (Marvelmind, 2020), lorsqu'aucun géoréférencement n'est appliqué aux balises fixes. On observe même des écarts allant jusqu'à 6.5 cm lorsque la balise mobile s'éloigne des balises fixes.

3.5.3. Mesure de distances entre deux points consécutifs espacés de 2m par le système de positionnement Marvelmind après géoréférencement

Expérimentation

Il s'agit de reproduire l'expérience précédente après géoréférencement des balises fixes. Cela permet d'obtenir des coordonnées de la balise mobile dans le même système que celui de la station totale. L'objectif est d'évaluer l'impact du géoréférencement effectué sur les balises fixes sur le positionnement de la balise mobile. La configuration géométrique des balises par rapport au rail est identique à celle de l'expérience 3.5.2 (Figure 3.8).

Résultats

Les résultats sont résumés dans le Tableau 3.3. X_{mobile} et Y_{mobile} sont les coordonnées de la balise mobile obtenues après géoréférencement des balises fixes. Δ_1 et Δ_2 sont les déplacements entre deux points consécutifs donnés respectivement par le système Marvelmind et l'interféromètre. La valeur absolue des différences entre ces deux déplacements est calculée.

Tableau 3.3 Comparaison entre les distances horizontales obtenues pour 8 points espacés de 2 m par le système Marvelmind et l'interféromètre laser après géoréférencement des balises fixes

Points	X_{mobile} (m)	Y_{mobile} (m)	Δ_1 (m) Déplacements par le système Marvelmind	Δ_2 (m) Déplacements par l'interféromètre	$ \Delta_1 - \Delta_2 $ (cm)
1 (0m)	104.341	92.187	0.000	0.000	0.0
2 (2m)	104.142	94.184	2.006	2.000	0.6
3 (4m)	103.929	96.174	2.000	2.000	0.0
4 (6m)	103.737	98.239	2.073	2.000	7.3
5 (8m)	103.538	100.167	1.938	2.000	6.2
6 (10m)	103.294	102.144	1.992	2.000	0.8
7 (12m)	103.131	104.150	2.013	2.000	1.3
8(14m)	102.924	106.132	1.992	2.000	0.8
				Écart moyen (cm)	2.1
				Écart-type (cm)	2.9

Analyse

Suite à cette expérimentation, on remarque qu'après géoréférencement des balises fixes, l'écart moyen entre les distances données par le système Marvelmind et celles de l'interféromètre ne s'est pas amélioré, en comparaison avec les valeurs du Tableau 3.2. Les écarts observés au niveau de certains points ont même augmenté. En effet, ceux observés à 6 m (point 4), 8 m (point 5) et 14 m (point 8) ont augmenté respectivement de 8 mm, 3 mm et 4 mm par rapport à l'expérience précédente. La Figure 3.9 permet une meilleure visualisation de ces résultats.

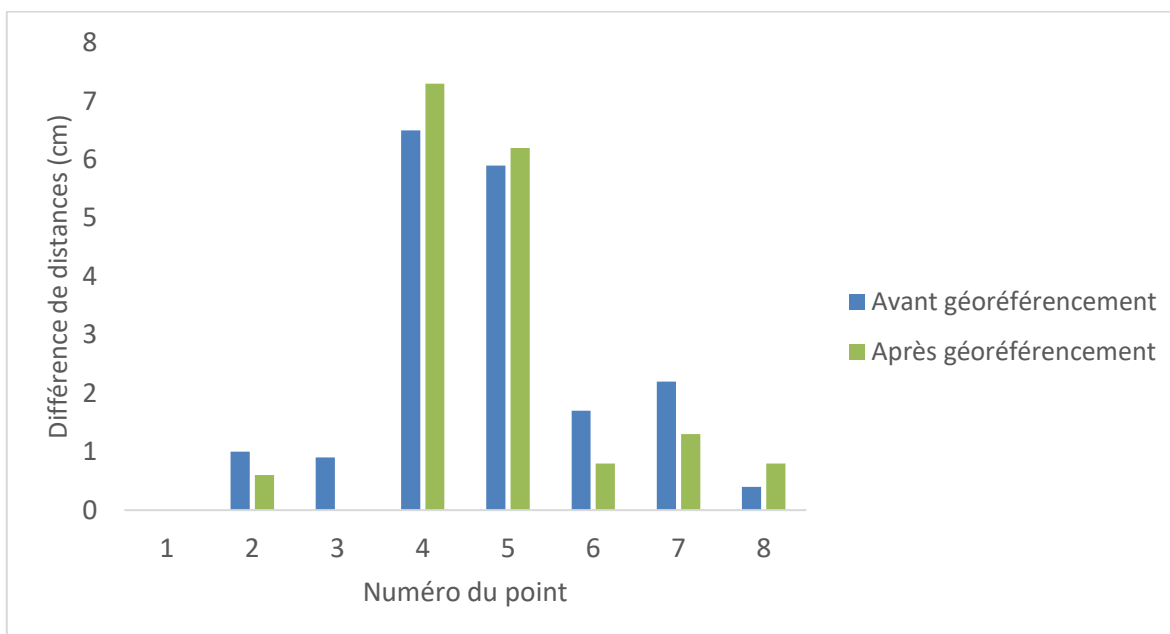


Figure 3.9 Différence entre les distances obtenues par le système Marvelmind et l'interféromètre avant et après géoréférencement

L'écart type devient légèrement plus grand entre les observations des points 4 et 5. Ce résultat est cohérent à celui de l'expérimentation précédente concernant la disposition des balises fixes par rapport au rail. Si en plus on considère l'incertitude du géoréférencement qui vient s'ajouter à celle du système Marvelmind, l'augmentation des écarts au niveau des points 4 et 5 est raisonnable. En résumé, les distances fournies par le système ont une incertitude de presque 2 cm si on fournit un géoréférencement aux balises fixes. Cependant, l'erreur de positionnement de la balise mobile semble augmentée lorsqu'elle s'éloigne des balises fixes, même lorsque celles-ci sont géoréférencées.

3.5.4. Comparaison entre les coordonnées de la balise mobile des points sur le rail obtenues avec la technologie Marvelmind et avec la multi-station après géoréférencement de 4 balises fixes

Expérimentation

L'objectif est d'évaluer l'incertitude des coordonnées fournies par la balise mobile. Pour cela, on utilise une station totale (multi-station) pour calculer les coordonnées d'un prisme se déplaçant le long du rail de 35 m situé dans le laboratoire de métrologie. On effectue

simultanément la poursuite de la balise mobile, fixée au-dessus du prisme, afin d'obtenir ses coordonnées au moyen de la technologie Marvelmind avec 4 balises fixes géoréférencées. On compare finalement ces coordonnées à celles obtenues par la station totale, lesquelles sont dans le même système de coordonnées.

Résultats

Le Tableau 3.4 présente les résultats obtenus.

Tableau 3.4 Coordonnées de 8 points d'observation situés sur le rail obtenues par le système Marvelmind (X_m et Y_m) et par la multi-station (X_s et Y_s) dans la configuration avec 4 balises fixes géoréférencées

Points	X_s (m)	X_m (m)	$ X_s - X_m $ (cm)	Y_s (m)	Y_m (m)	$ Y_s - Y_m $ (cm)
1	103.956	103.929	2.7	96.208	96.174	3.4
2	103.739	103.738	0.1	98.194	98.239	4.5
3	103.523	103.539	1.6	100.177	100.167	1.0
4	103.315	103.295	2.0	102.149	102.144	0.5
5	103.102	103.131	2.9	104.134	104.150	1.6
6	102.889	102.924	3.5	106.121	106.132	1.1
7	102.677	102.723	4.6	108.109	108.127	1.8
8	102.463	102.499	3.6	110.097	110.108	1.1
		Écart moyen (cm)	2.6		Écart moyen (cm)	1.9
		Écart-type (cm)	1.4		Écart-type (cm)	1.4

Analyse

Suite à cette expérimentation, on remarque que l'écart moyen obtenu en X est de 2.6 cm et celui de Y est 1.9 cm. Notons que l'axe Y est orienté dans le sens principal du déplacement de la balise mobile qui est d'environ 14 m entre les points 1 et 8 et que les variations sur l'axe X sont moins importants. Ces écarts sont cohérents avec ceux calculés pour les distances lors des expérimentations précédentes. Dans la prochaine section, on va analyser l'influence du nombre de balises fixes utilisées sur la qualité des coordonnées obtenues par le système.

3.5.5. Comparaison entre les coordonnées de la balise mobile et celles de la multi-station de points situés au milieu du laboratoire après géoréférencement de 6 balises fixes

Expérimentation

L'objectif est également d'évaluer l'incertitude des coordonnées fournies par la balise mobile. Dans cette configuration, on utilise 6 balises fixes pour couvrir la totalité du laboratoire de métrologie et comparer les coordonnées obtenues par la balise mobile à celles obtenues par la multi-station dans le but d'étudier la qualité des données produites par la balise mobile. Les points observés dans cette configuration sont disposés le long d'une ligne au milieu du laboratoire de métrologie, contrairement à l'expérimentation 3.5.4. où les points étaient sur le rail situé près d'un des deux murs longitudinaux. Cette configuration est illustrée à la Figure 3.10.

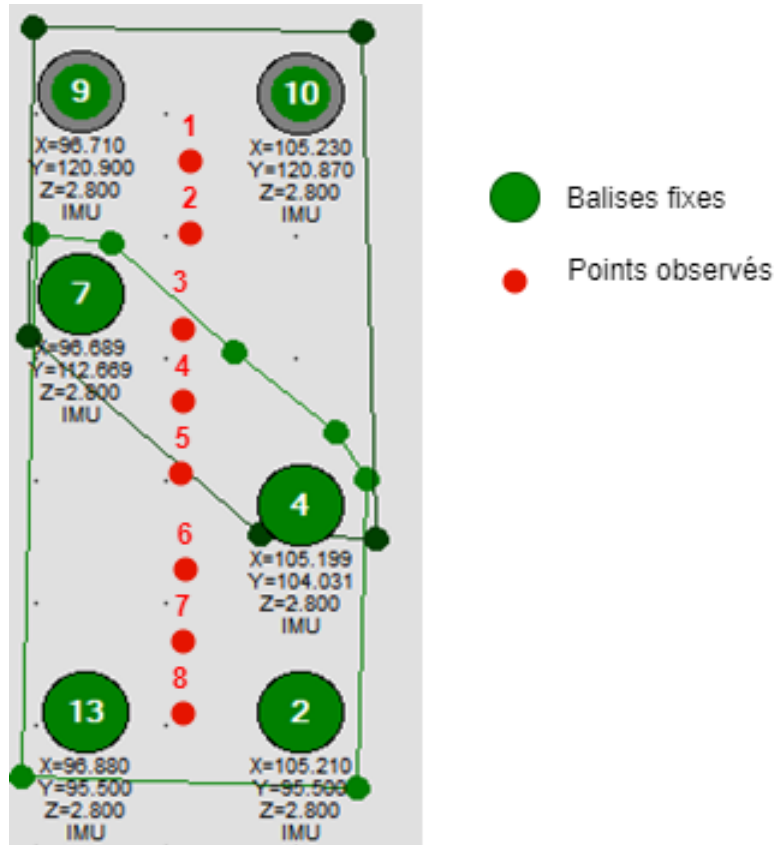


Figure 3.10 Disposition des points d'observation (en rouge) au milieu du laboratoire dont les positions sont estimées avec la configuration à 4 balises (9, 10, 13 et 2) et avec la configuration à 6 balises (9, 10, 13, 2, 4 et 7)

Résultats

Pour évaluer l'existence d'une tendance/biais au niveau des coordonnées acquises par la balise mobile, on trace d'abord les observations au point 1 et au point 2 dans le but d'étudier leurs dispersions. Les figures 3.11 et 3.12 illustrent la dispersion des observations faites par la balise mobile aux point 1 et au point 2 et le Tableau 3.5 présente les résultats obtenus par la configuration à 6 balises fixes.

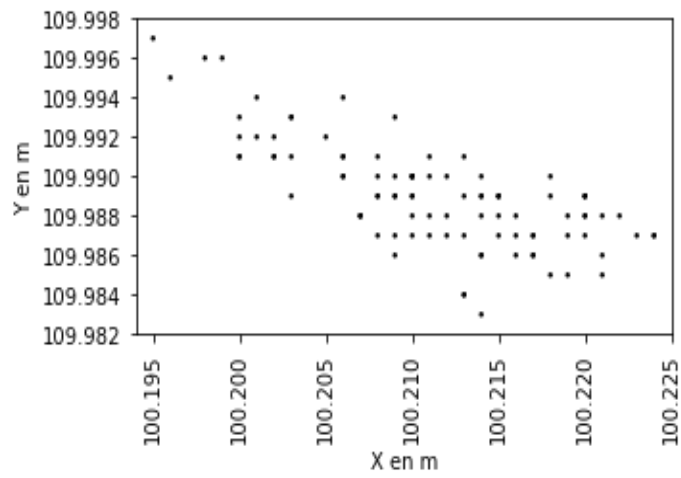


Figure 3.11 Distribution des observations de la balise mobile au niveau du point 1

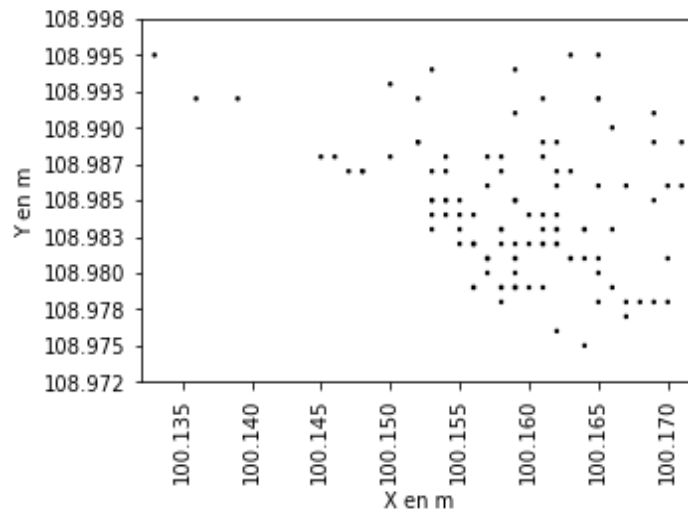


Figure 3.12 Distribution des observations de la balise mobile au niveau du point 2

Tableau 3.5 Coordonnées de 8 points d'observations situés au milieu du laboratoire et obtenues par le système Marvelmind (X_m et Y_m) et par la multi-station (X_s et Y_s) dans la configuration avec 6 balises fixes géoréférencées

Points	X_s (m)	X_m (m)	$ X_s - X_m $ (cm)	Y_s (m)	Y_m (m)	$ Y_s - Y_m $ (cm)
1	100.156	100.211	5.5	109.848	109.989	14.1
2	100.122	100.159	3.7	108.870	108.984	11.4
3	100.092	100.122	3.0	107.861	107.953	9.2
4	100.061	100.089	2.8	106.853	106.919	6.6
5	100.026	100.043	1.7	105.844	105.893	4.9
6	100.013	100.0139	0.1	104.840	104.863	2.3
7	99.987	100.008	2.1	103.843	103.841	0.2
8	99.975	99.962	1.3	102.837	102.804	3.3
		Écart moyen (cm)	2.5		Écart moyen (cm)	6.5
		Écart-type (cm)	1.6		Écart-type (cm)	4.8

Analyse

À partir des Figure 3.11 et Figure 3.12, On remarque que la dispersion d'échantillons de points par la technologie Marvelmind servant à la localisation du point 1 et du point 2 est de 4 cm en X et de 2 cm en Y. Sur d'autres points observés, la dispersion au niveau des axes X et Y est inversée mais demeure du même ordre de grandeur, ce qui est représentatif de l'incertitude associée au système de positionnement Marvelmind. En calculant les écarts types pour chaque coordonnée, on obtient pour le point 1 un écart type en X de 7 mm un écart type en Y, de 3 mm. De même pour le point 2, l'écart type en X est de 7 mm alors qu'il est de 5 mm pour Y. On a également analysé les écarts types pour les autres points observés, ces derniers ne dépassent pas 10 mm. Donc on peut conclure que les observations de la balise mobile restent concentrées dans un rayon ne dépassant pas 1 cm. À la lumière de ces résultats, on peut affirmer que le système a une incertitude relativement bonne pour les deux coordonnées. Par conséquent, le constat relevé dans l'expérimentation 3.5.1 lié à la qualité des coordonnées Y semble plus causé par la qualité du géoréférencement le long de cette direction.

Suite aux expérimentations réalisées, on remarque que les écarts au niveau des coordonnées obtenues en utilisant 4 balises fixes (Tableau 3.4) sont plus petits que les écarts obtenus en utilisant 6 balises fixes (5). L'utilisation d'un nombre plus important de balises n'améliore donc pas l'incertitude du positionnement. En effet, un ensemble de 4 balises fixes définissent une zone de service. Ces balises seront utilisées pour le calcul de position tant que le mobile est situé à l'intérieur de cette zone. Par conséquent, l'utilisation de 6 balises fixes nécessite une étape supplémentaire pour le mobile s'il se retrouve à l'extérieur de la zone de service. Celui-ci devra détecter une nouvelle configuration de 4 balises fixes, i.e. une nouvelle zone de service. Pendant ce temps, le positionnement est interrompu et l'incertitude peut donc être affectée. Cela expliquerait potentiellement les écarts importants observés dans la deuxième configuration. Une raison supplémentaire est liée aux conclusions tirées depuis l'expérimentation 3.5.1. En effet, la disposition des points dans la configuration à 6 balises est telle que la composante Y des distances entre les balises fixes est plus importante que la composante X (compte tenu du système local utilisé pour le géoréférencement). En terminant, plus de tests auraient besoin d'être réalisés afin de mieux comprendre le comportement du système Marvelmind lors de la transition d'une zone de service à l'autre et de configurer les balises fixes d'une façon optimale.

3.5.6. Étude de la dérive des trajectoires et de leurs incertitudes

Après avoir évalué le système de positionnement avec ce premier kit de démarrage de balises Marvelmind, nous avons procédé à l'acquisition d'un autre kit pour étudier la scalabilité du système de positionnement et vérifier si celui-ci garde le même comportement avec un nombre plus grand de balises fixes. Pour cela, on étudie la qualité des trajectoires produites par la balise mobile en mode dynamique selon deux patrons de ligne prédéterminés, d'abord sur une ligne dans les deux sens du parcours (aller et retour) et ensuite sur une trajectoire fermée de type boucle. Ceci permettra de faire la comparaison entre les coordonnées estimées par le système de positionnement Marvelmind et celles obtenues par la multi-station. À l'issue de cette comparaison, on vérifie si le système produit ou non une dérive temporelle. Les trajectoires obtenues sont illustrées aux figures 3.13, 3.14 et 3.15.

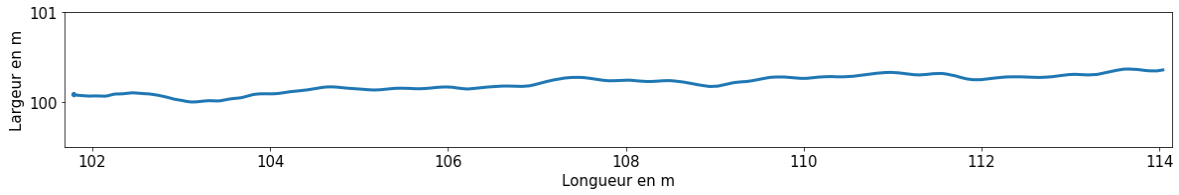


Figure 3.13 Trajectoire d'une ligne obtenue par le système Marvelmind à l'aller

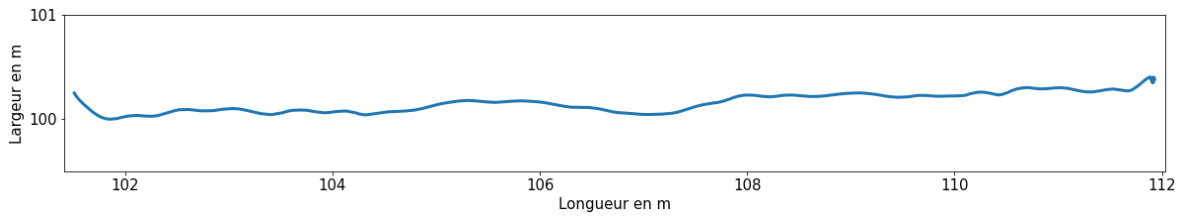


Figure 3.14 Trajectoire d'une ligne obtenue par le système Marvelmind au retour

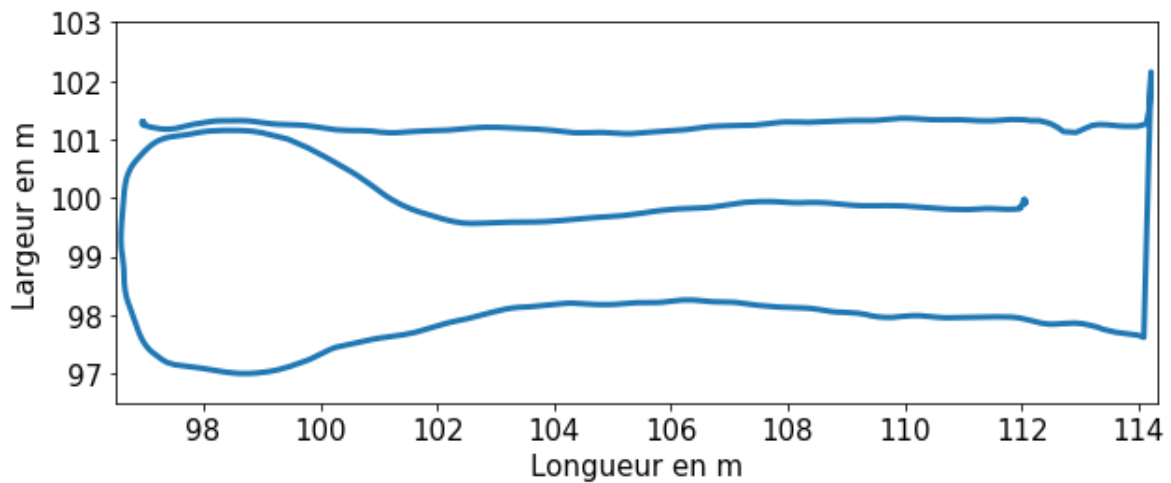


Figure 3.15 Trajectoire d'une boucle obtenue par le système Marvelmind

Pour vérifier la dérive des trajectoires obtenues par le système Marvelmind, on les compare à celle obtenue par une multi-station. Les Figure 3.16, Figure 3.17 et Figure 3.18 présentent respectivement la trajectoire aller, la trajectoire retour ainsi qu'une trajectoire en boucle obtenues par Marvelmind superposées à la trajectoire de référence obtenue par la multi-station.

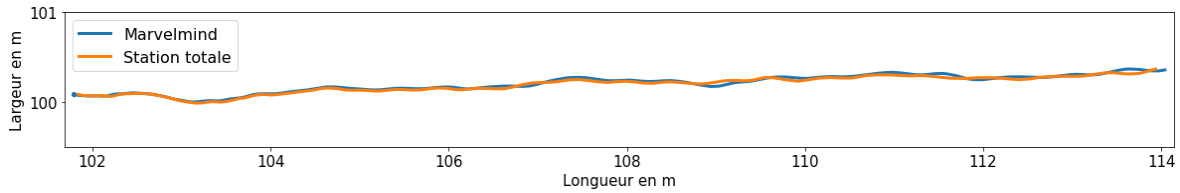


Figure 3.16 Comparaison entre la trajectoire aller Marvelmind et celle de la multi-station

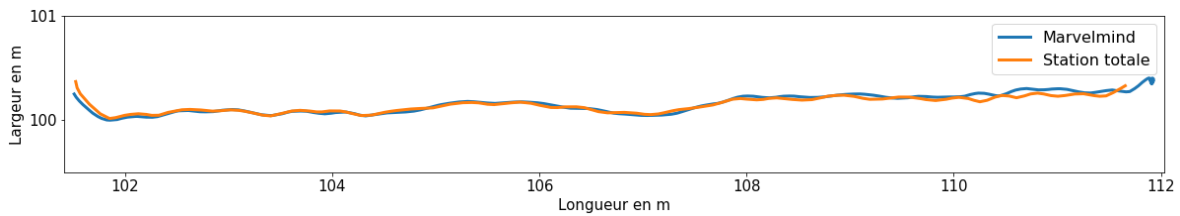


Figure 3.17 Comparaison entre la trajectoire retour Marvelmind et celle de la multi-station

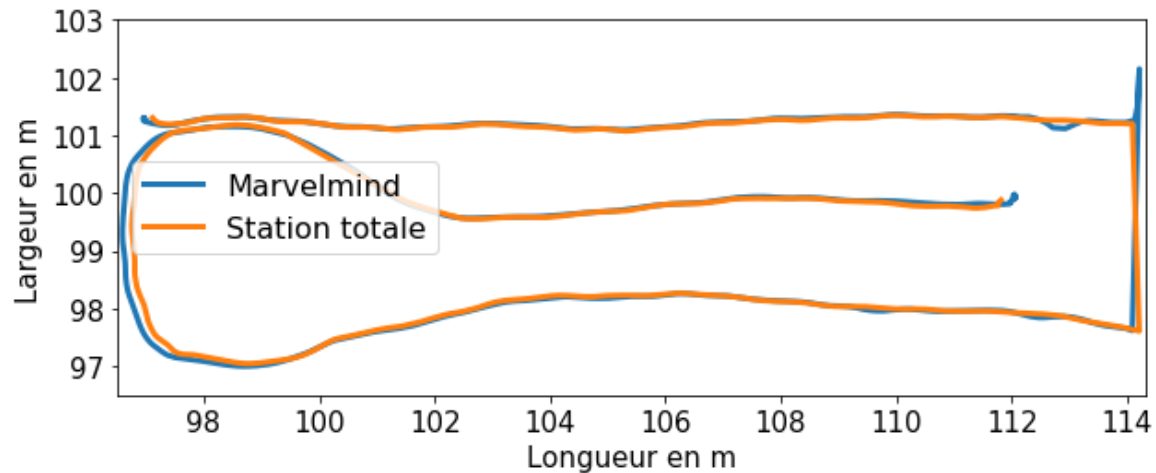


Figure 3.18 Comparaison entre la trajectoire en boucle Marvelmind et celle de la multi-station

Analyse

Suite à cette expérimentation, on remarque que les deux trajectoires, produites par le système Marvelmind et par la multi-station, se superposent relativement bien. Aucune dérive de la trajectoire n'apparaît visuellement. Pour une analyse plus rigoureuse, on a découpé l'étendue des deux ensembles de coordonnées pour la trajectoire en boucle (X et Y) en 25 intervalles égaux au moyen d'une fonction développée en langage Python dont le code source est présenté à l'Annexe A1. Dans chaque intervalle, on a calculé la moyenne des observations pour chaque trajectoire, à savoir celle de Marvelmind et celle de la station totale. La différence entre les moyennes obtenues est ensuite calculée pour avoir une estimation de

l'écart entre les deux trajectoires dans l'intervalle en question. La moyenne des écarts pour tous les intervalles est calculée pour analyser la qualité de la trajectoire obtenue par Marvelmind. Il faut noter que cette comparaison par intervalle est nécessaire étant donné que les points observés par Marvelmind ne correspondent pas nécessairement à ceux observés par la station totale. La moyenne des écarts obtenus pour la longueur est de 2 cm. Celle obtenue pour la largeur est de 4 cm. On remarque que l'écart en largeur entre les deux trajectoires est le double de celui de la longueur. Ce résultat est cohérent avec celui de l'expérimentation 3.5.1 où on avait conclu que le système Marvelmind est potentiellement moins précis dans la direction de la largeur du site d'acquisition. Cet écart de 4 cm sur la largeur pourrait être causée par une erreur systématique liée à l'alignement de la balise fixe au-dessus du prisme de la station totale. Quant à l'écart de 2 cm le long de la trajectoire sur l'axe longitudinal, elle demeure à l'intérieur des limites d'incertitudes du fabricant et cet écart n'augmente pas avec le temps.

3.6. Conclusion :

La première partie du chapitre a d'abord présenté les critères sur lesquels nous avons basé le choix de la technologie de positionnement intérieur. Il s'agit d'une technologie par trilatération ultrasonore qui offre un bon compromis entre incertitude et coût de déploiement. Le reste du chapitre a ensuite fourni une description de chaque expérimentation réalisée afin d'évaluer le système de positionnement intérieur dans sa globalité, à savoir son incertitude interne, la qualité de ses mesures de distances entre les balises fixes et l'incertitude relative de la balise mobile par rapport à des mesures de référence obtenues avec la multi-station MS60. Nous avons mis en œuvre une série d'expérimentations qui ont permis d'étudier la dérive des trajectoires acquises par la balise mobile du système de positionnement intérieur choisi. Ce chapitre a montré que le géoréférencement des balises fixes est important et est bien exploité par le système dans le calcul de positions de la technologie Marvelmind. On a également montré que l'incertitude du calcul des distances est d'ordre centimétrique (jusqu'à 3.3 cm) et est légèrement moins précise que celle publiée dans les spécifications techniques du concepteur de la technologie qui est de 2 cm. Finalement, les trajectoires obtenues par le système sont de bonne qualité et ne présentent pas de dérive.

Chapitre 4 : Intégration physique de la balise mobile avec un SLM: méthodologie, résultats obtenus et analyse

4.1. Introduction

L'objectif est d'intégrer la balise mobile avec un système LiDAR mobile et de réaliser une acquisition avec ce système intégré. En effet, les systèmes de positionnement intérieur basés sur les SLMs utilisent les méthodes SLAM pour la localisation et les techniques ICP pour la construction du nuage de points global tel qu'introduit à la section 2.4. Cependant, la solution donnée est susceptible de présenter une dérive à cause de l'accumulation des erreurs de la centrale inertielle (Chow, 2017). Pour réaliser cette étape d'intégration d'une balise Marvelmind avec un SLM, nous avons collaboré avec l'équipe de Norlab qui est un laboratoire de robotique à l'Université Laval, laquelle possède une expertise avancée dans ce domaine.

4.2. Description des outils utilisés

Dans ce qui suit, une description du matériels et logiciels utilisés est fournie.

4.2.1. Matériels utilisés

- Un scanner LiDAR RS-LiDAR-16 de RoboSense (Figure 4.1): celui-ci utilise 16 faisceaux pour faire l'acquisition et possède un angle d'ouverture entre 0.1° et 0.4° . Le nombre de points acquis est d'environ 300,000 pts/s (robosense, 2021);
- Une unité de mesure inertielle IMU MTI-30 de xsense (Figure 4.2) : celle-ci fait l'acquisition des données à une fréquence de 100 Hz (xsens, 2021);
- Un nano-ordinateur Raspberry Pi qui permettra l'exécution des différents programmes nécessaires à l'intégration (Figure 4.3); et
- Le système de positionnement de Marvelmind.



Figure 4.1 RS-LiDAR-16 de RoboSense (robosense, 2021)

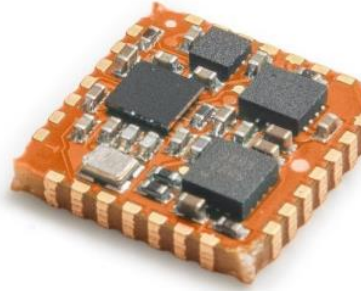


Figure 4.2 IMU MTI-30 de xsense (xsens, 2021)



Figure 4.3 Le nano-ordinateur Raspberry Pi (Raspberry Pi, 2021)

4.2.2. Logiciels utilisés

Les programmes réalisés pour l'intégration sont développés à l'aide de la librairie open source ROS (Robot Operating System). Il s'agit d'un cadre logiciel qui fournit des bibliothèques pour créer des applications robotiques. L'intégration réalisée est également basée sur la librairie logiciel de cartographie de Norlab (NorLab, 2021), Norlab ICP Mapper, qui s'appuie sur une version améliorée de l'algorithme ICP (Vaidis et al., 2020).

4.3. Intégration physique de la balise mobile avec un Système Lidar Mobile (SLM)

Les étapes de cette intégration sont détaillées dans les prochaines sections.

4.3.1. Calcul de l'orientation du SLM dans le repère de la centrale inertielle

Pour cela, un filtre de Madgwick (Madgwick et al., 2011) est mis en place. Ce dernier est utilisé pour filtrer et fusionner les données brutes d'une centrale inertielle.

4.3.2. Modification du pilote Marvelmind

Le pilote de Marvelmind est modifié de façon à ajouter un horodatage absolu aux mesures de position (Deschênes, 2021c). Les positions calculées par la balise mobile sont envoyées

vers le tableau de bord du logiciel sans aucune mesure de temps. Cependant, cette mesure est nécessaire pour pouvoir effectuer l'intégration qui tient compte que la fréquence d'acquisition des données par la balise mobile est différente de celle de la centrale inertielle.

4.3.3. Calcul de la rotation entre le repère inertielle et celui des balises Marvelmind

L'objectif est de passer du repère inertielle vers celui utilisé par les balises Marvelmind. Pour cela, une calibration à trois points est effectuée. Le SLM est placé à trois positions différentes. À chaque position, les coordonnées données par la balise (dans le repère des balises Marvelmind) et par le SLM (dans le repère inertielle) sont enregistrées. Avec le système d'équations résultant, il est possible de calculer la rotation entre ces deux repères (Deschênes, 2021a).

4.3.4. Fusion des coordonnées de la balise mobile aux données d'orientation du SLM

La balise mobile produit des positions à une fréquence de 16 Hz alors que la centrale inertielle a une fréquence de 100 Hz. Par conséquent, pour fusionner les données de position acquises par la balise et les données d'orientation observées par la centrale inertielle, chaque position calculée par la balise mobile est transformée vers le repère inertielle à l'aide de la matrice de rotation obtenue à l'étape 4.3.3. Ensuite la dernière observation donnée par la centrale inertielle est utilisée pour obtenir l'orientation (Deschênes, 2021b).

4.3.5. Construction du nuage de points global

La génération d'un nuage de points géoréférencé dans le système de coordonnées des balises est finalement réalisée. Chaque nuage de points est transformé dans le repère inertielle et ajouté au nuage de points global à l'aide de la position du lidar au moment de son acquisition.

Le système intégré est illustré à la Figure 4.4.

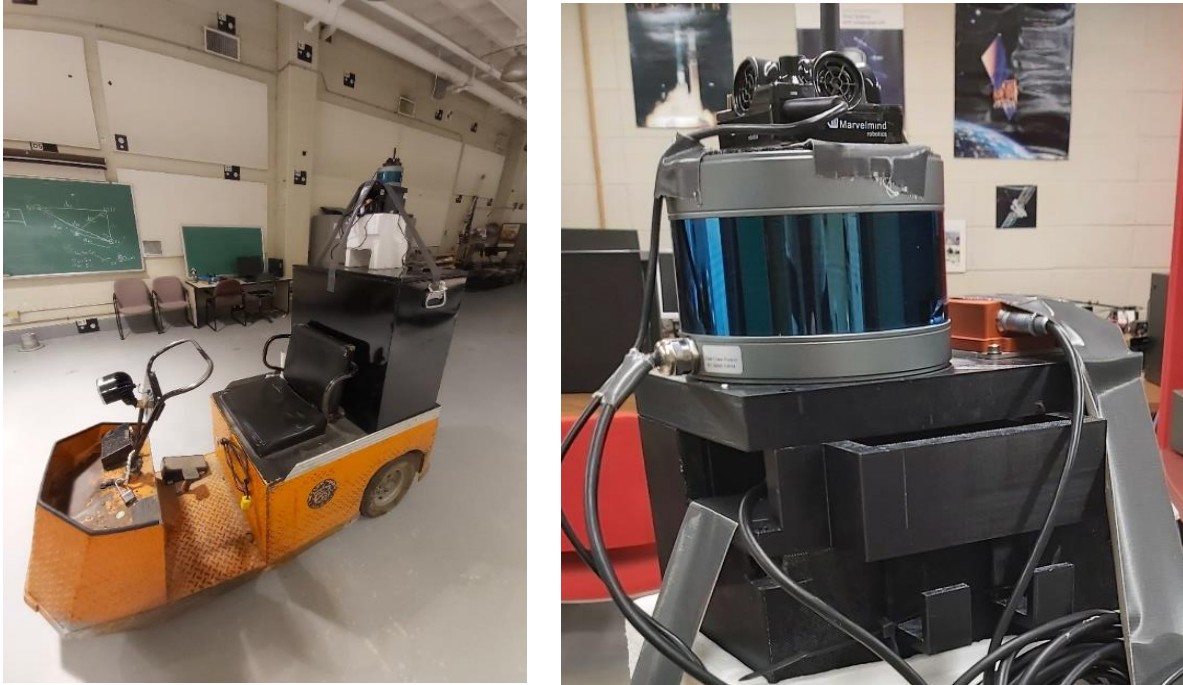


Figure 4.4 Systeme LiDAR (Robosense) et balise mobile (Marvelmind) integre

4.4. Acquisition des donnees avec le systeme integre

Le systeme integre est compose de la balise mobile de Marvelmind, du scanneur LiDAR RS-LiDAR-16 de RoboSense, de l' unite de mesure inertielle IMU MTI-30 de xsens et du nano-ordinateur Raspberry Pi. L' ensemble de ces capteurs a ete installe sur un boitier fabrique sur mesure avec une imprimante 3D. Le nuage de points produit par le systeme integre acquis a l'interieur du Laboratoire de metrologie est illustre dans la Figure 4.5.

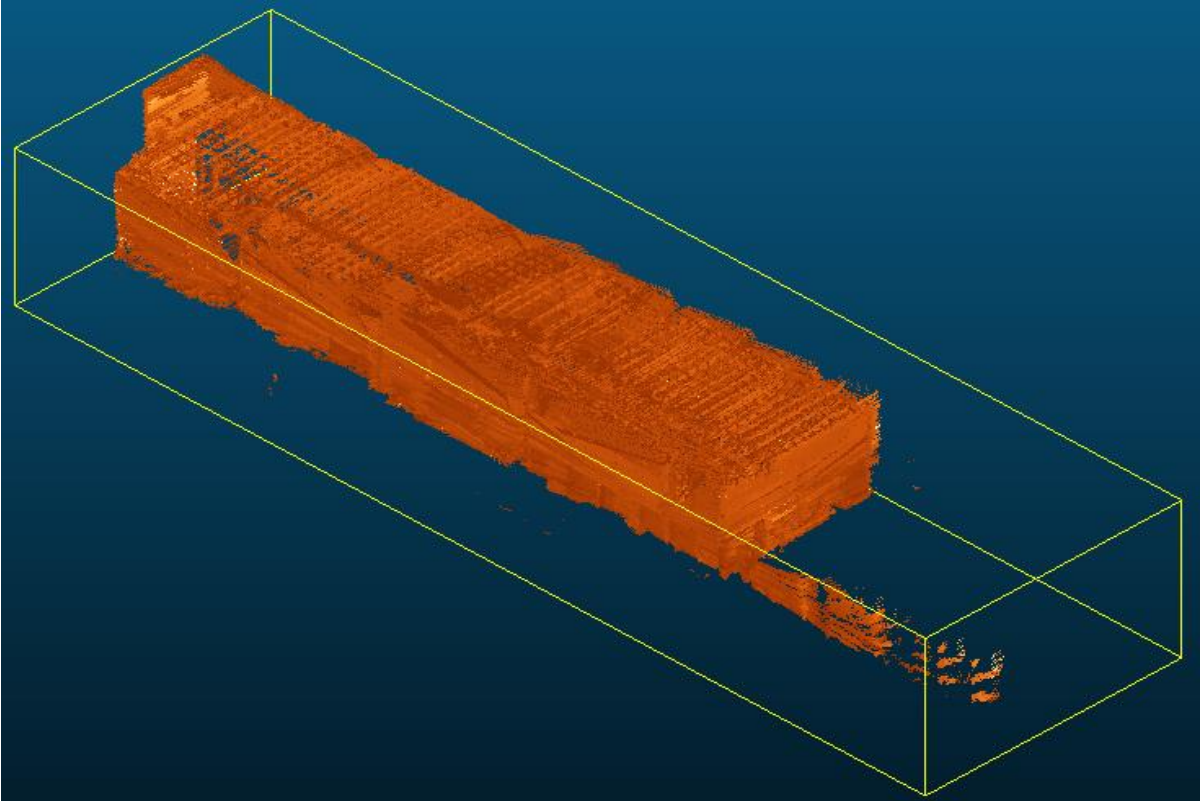


Figure 4.5 Nuage de points acquis avec le système intégré géoréférencé à partir de la trajectoire Marvelmind

4.5. Analyse de la qualité du nuage de points produit

4.5.1. Comparaison à un nuage de points de référence

Lors de cette étape de la méthodologie, nous évaluons la qualité du nuage de points acquis avec le système intégré dans le laboratoire de métrologie en le comparant avec un nuage de points de référence acquis avec le scanneur statique de marque FARO X130 (Figure 4.6). Cette analyse est faite avec le logiciel de traitement de nuage de points open source CloudCompare en exploitant l'algorithme M3C2 (Multiscale Model to Model Cloud Comparison) (Lague et al., 2013). Celui-ci permet de calculer les distances entre deux nuages de points, un nuage de référence et un nuage comparé, de la façon suivante :

- Génération d'un ensemble de points, appelés points principaux, au niveau du nuage de points de référence. Ces points sont souvent calculés en faisant un sous-échantillonnage du nuage de points de référence;

- Estimation des normales à la surface au niveau de chaque point principal;
- Calcul de distances : les normales estimées sont utilisées pour projeter les points principaux sur les deux nuages de points.

Grâce à cet outil, nous pouvons mieux évaluer les capacités et les limites du système intégré, entre autres sa capacité à générer un nuage de points géoréférencé dans un environnement intérieur.

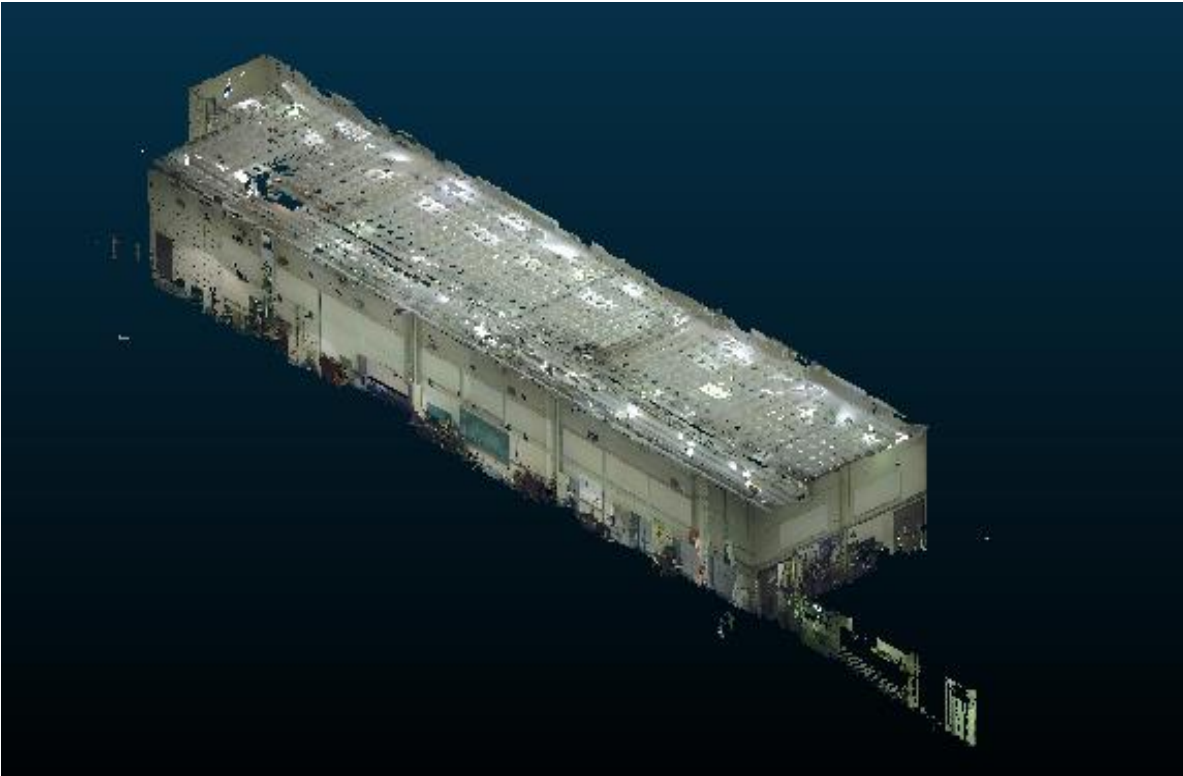


Figure 4.6 Nuage de points de référence du laboratoire de métrologie acquis avec le scanneur statique FARO X130

Les distances obtenues sont illustrées dans la Figure 4.7.

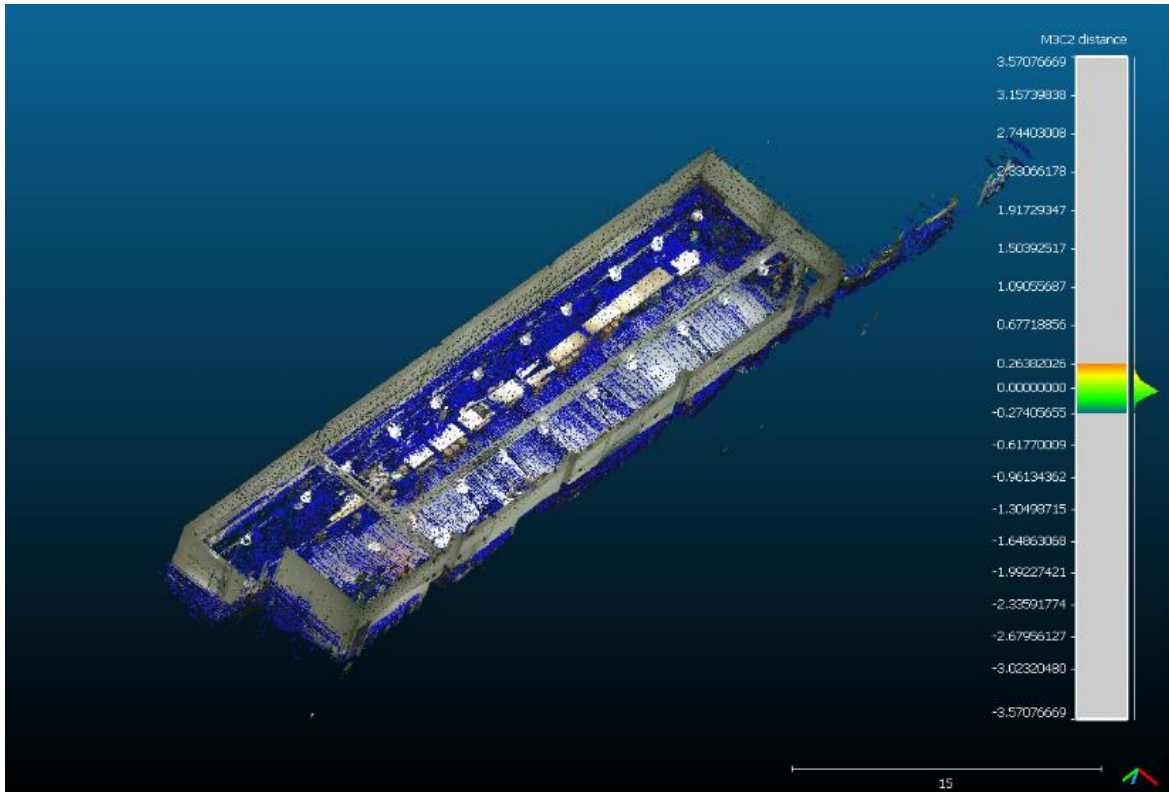


Figure 4.7 Illustration des distances entre le nuage de points acquis par notre système intégré et celui acquis par FARO selon une échelle de couleur du bleu (courte distance) vers le rouge (grande distance)

Analyse

La Figure 4.7 montre que les distances ou écarts entre les deux nuages de points sont faibles. De plus, la Figure 4.8 montre que la moyenne de ces écarts est de 2 cm et que près de 67% de ces écarts ne dépassent pas 4 mm. Les écarts sont donc uniformes sur toute la surface couverte en plus d'être petits. On peut en déduire que le nuage de points ainsi produit est de bonne qualité étant donné sa bonne correspondance avec le nuage de points de référence et de l'uniformité des écarts.

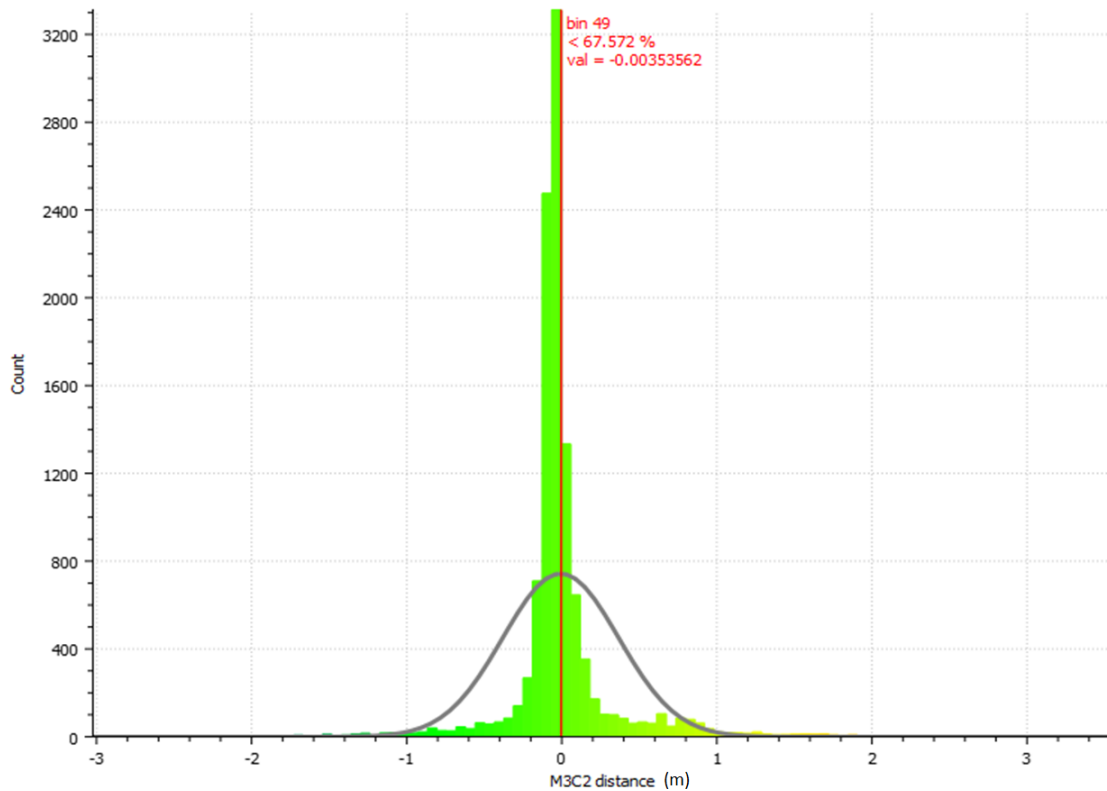


Figure 4.8 Distribution des distances entre les deux nuages de points

4.5.2. Comparaison de la trajectoire du SLM avec celle d’ICP

De plus, pour mettre en évidence que le système Marvelmind ne présente pas de dérive, on a comparé notre trajectoire avec celle produite par le système ICP détaillé dans la section 2.4.4 (Figure 4.9)

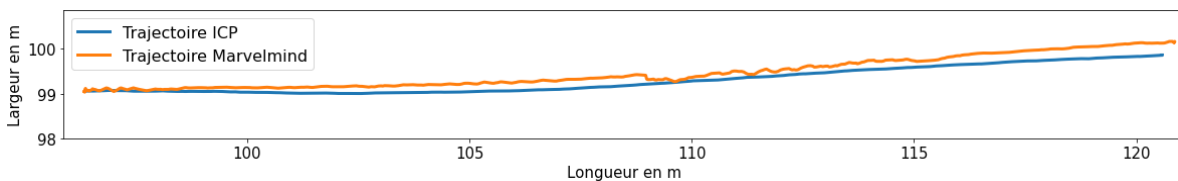


Figure 4.9 Comparaison entre la trajectoire produite par le système Marvelmind et celle du système ICP

Analyse

On peut remarquer une lente dérive de la trajectoire du système ICP par rapport à celle de Marvelmind. Pour mener une analyse plus minutieuse de la dérive, on a calculé les

distances entre les deux trajectoires à chaque seconde du parcours. Celles-ci ont ensuite été moyennées selon des intervalles de temps de 5 s produisant 13 valeurs dont chacune correspond à un intervalle. Les résultats obtenus au moyen d'une fonction développée en langage Python (voir code source à l'Annexe A2) sont illustrés à la Figure 4.10.

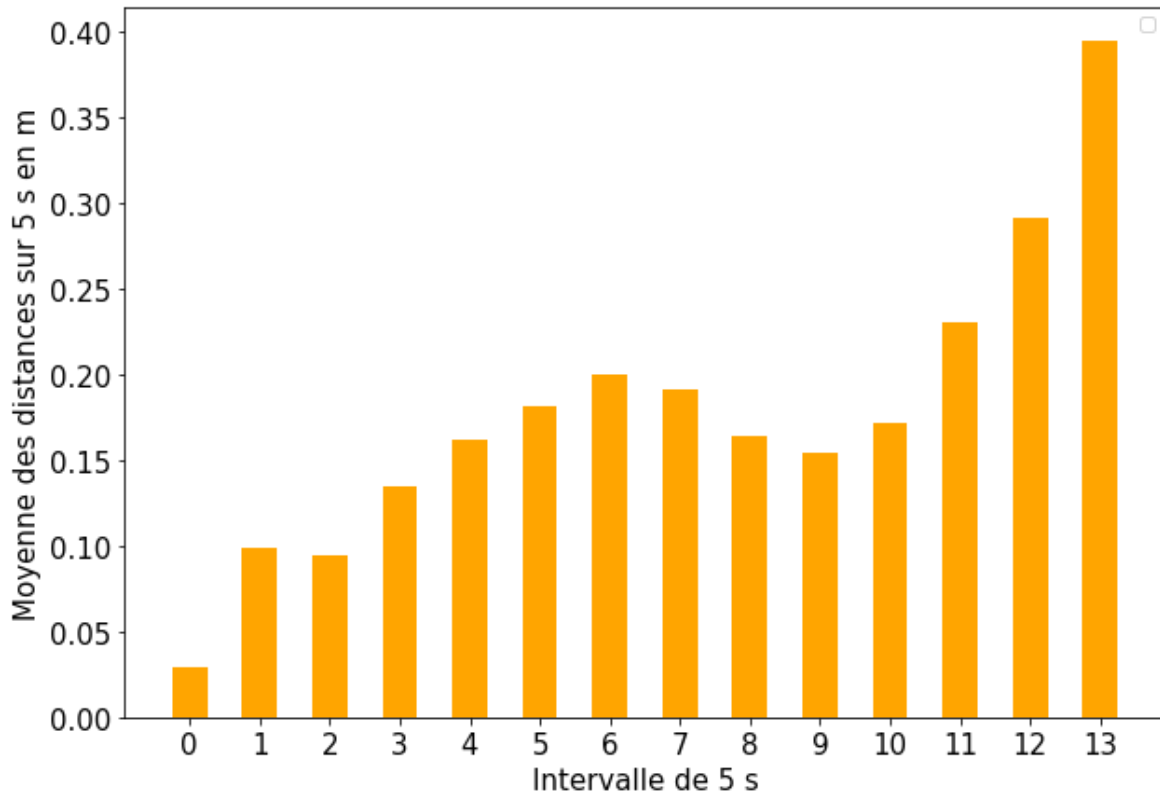


Figure 4.10 La moyenne des distances entre la trajectoire de Marvelmind et celle d'ICP calculé sur des intervalles de 5s

La distance moyenne entre les deux trajectoires est de 17 cm et plus de 75% des distances observées sont inférieures à 20 cm. On peut également remarquer que ces distances deviennent plus importantes avec le temps. Cet accroissement des distances est causé par l'algorithme ICP qui utilise une centrale inertielle dont l'accumulation des erreurs cause une dérive des trajectoires. Comme il a été démontré à la section 3.5.6, les trajectoires produites par le système de Marvelmind ne présentent pas de dérive étant donné leurs bonnes correspondances avec celles produites par une multi-station. La technologie permettrait donc d'améliorer la qualité des trajectoires d'un système LiDAR mobile intérieur utilisant une technique de type ICP. On peut en déduire que les positions données par la balise mobile

maintiennent une bonne qualité de positionnement en mode dynamique et permettent d'éviter sa dérive au cours du temps.

4.6. Réalisation d'un test préliminaire dans les corridors du campus (environnement similaire au milieu minier souterrain)

L'objectif de ce test est de valider si le système de positionnement Marvelmind est capable de livrer des trajectoires de bonne qualité dans un environnement complexe similaire au milieu minier souterrain (Figure 4.11). Le test nous permettra aussi de faire une mise au point sur les limites de ce système de positionnement par rapport à l'environnement d'acquisition.



Figure 4.11 Portion d'un corridor du campus de l'Université Laval (vue en plan à gauche et vue perspective à droite)

La première phase est la préparation du site d'acquisition. Celle-ci se fait en plusieurs étapes (Figure 4.12).

- Détermination de la configuration géométrique et du nombre des balises fixes en tenant compte des restrictions imposées par le site d'acquisition;
- Installation des balises fixes afin de couvrir la totalité du corridor; et
- Détermination des coordonnées des balises fixes par la multi-station MS60 pour faire le paramétrage sur le tableau de bord (logiciel Dashboard) de Marvelmind.

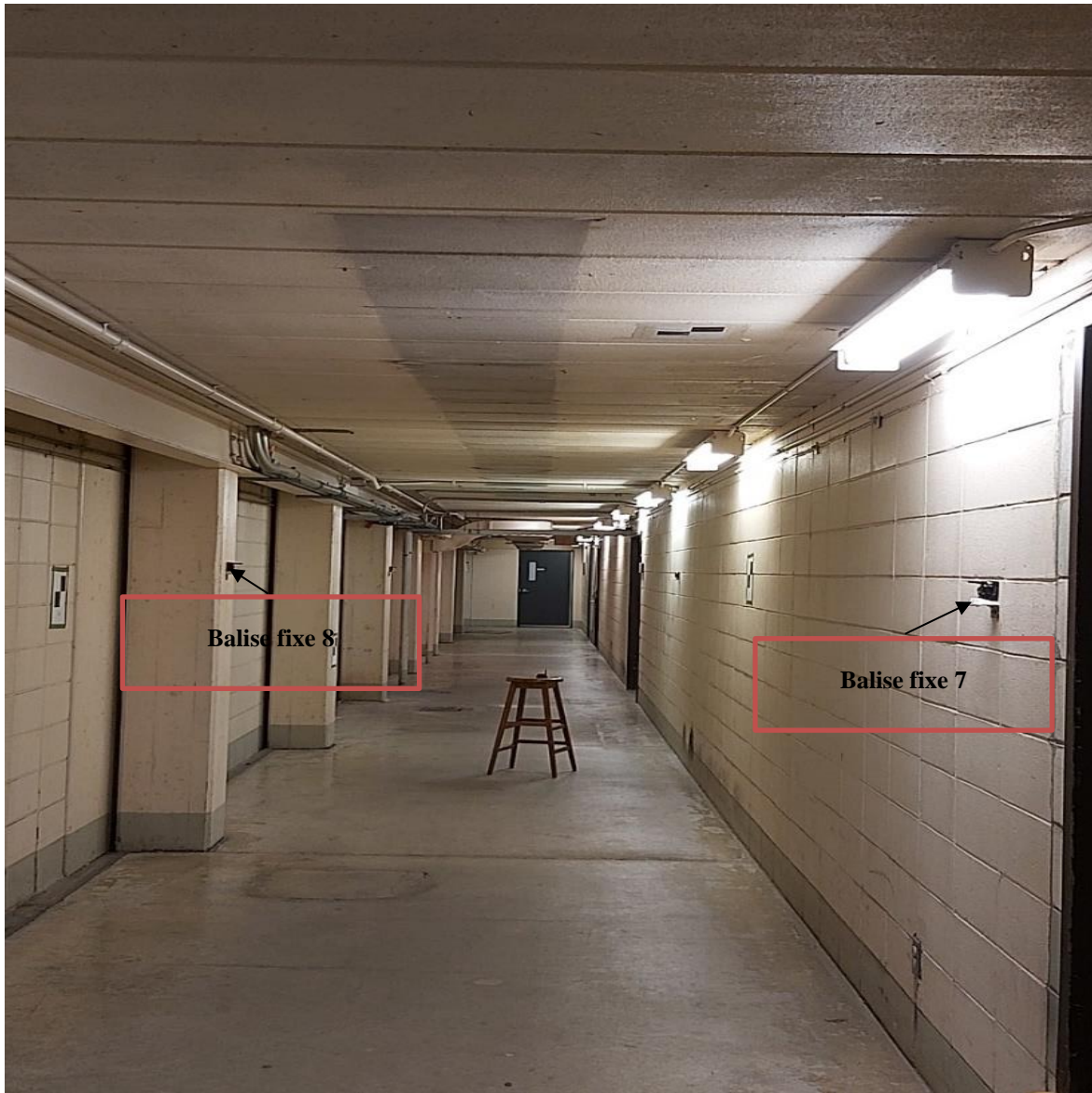


Figure 4.12 Préparation du site d'acquisition dans un corridor du campus

Résultats

Le résultat du paramétrage de la configuration géométrique des balises fixes effectué est présenté à la Figure 4.13 où les disques en vert représentent les balises fixes numérotés de 1 à 4 et de 6 à 10. La balise mobile porte le numéro 5. Ensuite, nous passons à l'acquisition de la trajectoire de la balise mobile 5. Le résultat de cette acquisition est montré à la Figure 4.15 et à la Figure 4.14.

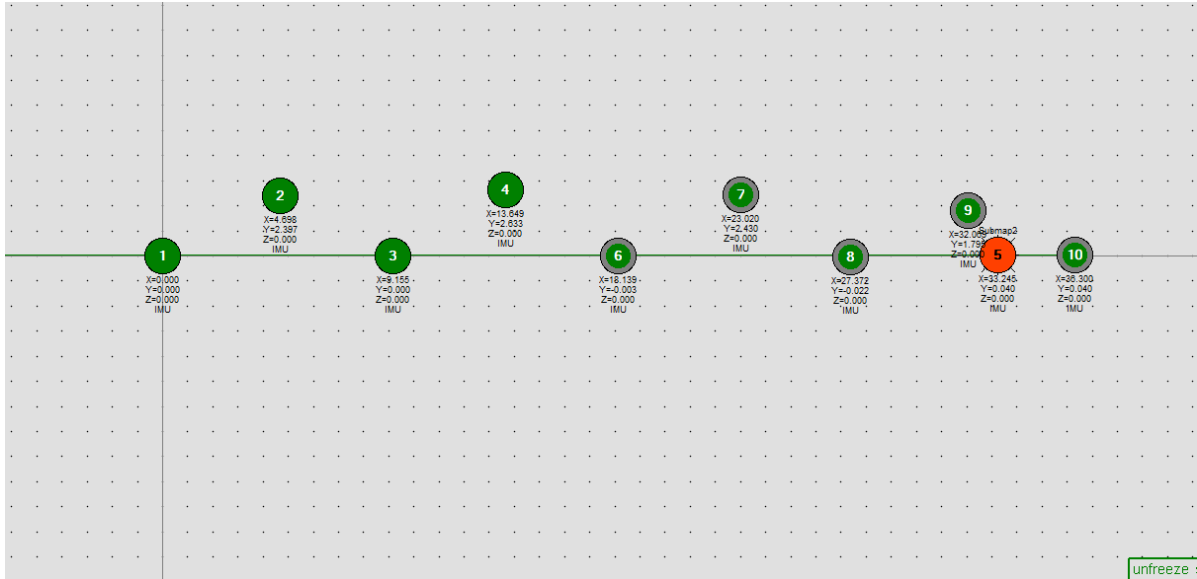


Figure 4.13 Résultat du paramétrage effectué sur le logiciel Dashboard de Marvelmind

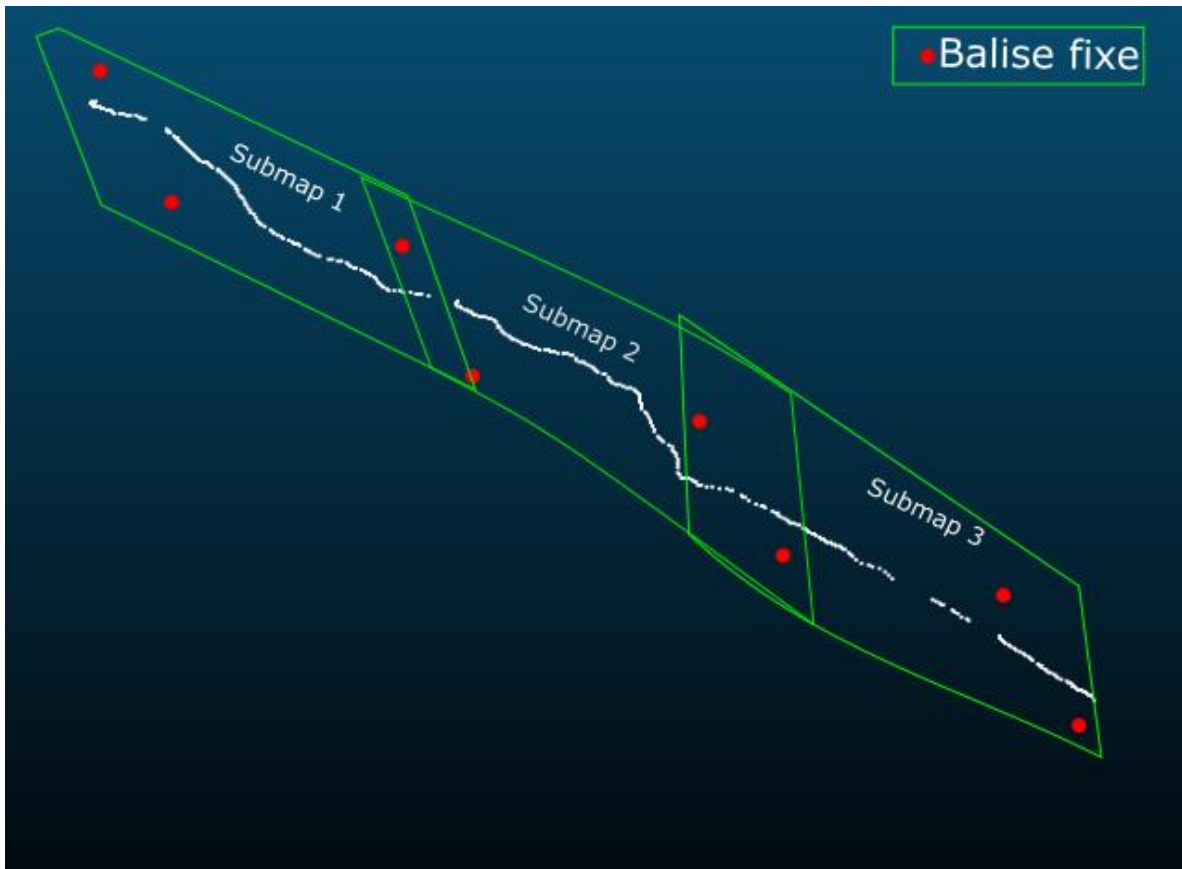


Figure 4.14 Trajectoire de la balise mobile générée à partir du fichier de données .log

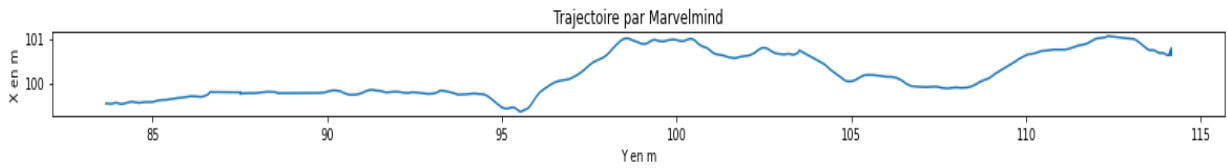


Figure 4.15 Trajectoire de la balise mobile après suppression des coupures

Analyse

Suite à cette expérimentation, on remarque la présence de coupures dans la trajectoire brute obtenue par le système Marvelmind (Figure 4.14). On remarque que ces coupures sont localisées dans les zones de passage d'une configuration de 4 balises de service à l'autre. Comme mentionné à la section 3.5.5, la balise mobile est forcée d'interrompre la localisation lors du passage vers une nouvelle configuration de 4 balises fixes. Cependant, on remarque également l'existence de coupures au sein d'un même zone de service. Ces dernières sont potentiellement dû à l'effet multi-trajet causé par la présence importante d'obstacles dans la zone d'acquisition. Cette expérimentation montre donc les limites possibles du système en cas d'utilisation dans un vrai tunnel minier souterrain. Cela met en évidence la nécessité de conduire davantage d'expérimentations dans ces environnements afin de mieux évaluer la possibilité d'utilisation du système Marvelmind dans ce contexte. Notamment, l'installation des balises fixes au plafond du corridor devraient limiter les coupures de signal dues à la présence d'obstacles et à l'effet multi-trajet et améliorer la constance et la qualité de la trajectoire.

4.7. Conclusion

La première partie du chapitre a d'abord présenté la méthodologie suivie pour réaliser l'intégration de la balise mobile du système de positionnement avec un SLM au moyen de la librairie ROS en collaboration avec le laboratoire Norlab. Ensuite, nous avons décrit la dernière étape de la méthodologie consistant à analyser la qualité des nuages de points produits par le système intégré. La qualité de nuages de points ainsi acquis s'est avérée bonne avec des écarts faibles et uniformes par rapport à un nuage de points de référence. Le système Marvelmind présente donc un bon potentiel pour la production d'une trajectoire suffisamment précise servant à l'acquisition de nuages de points géoréférencés dans des

environnements intérieurs. Cependant, ce système présente également des aspects pouvant limiter son déploiement dans un tunnel minier souterrain. Ces aspects sont notamment liés à l'effet multi-trajet qui cause des coupures au niveau des trajectoires.

Conclusion générale

Ce travail avait comme objectif l'amélioration de la précision des levés miniers souterrains acquis par les SLMs. Le système développé comprend un réseau de navigation intérieur basé sur la trilatération ultrasonore. Ce dernier est composé de plusieurs balises fixes et d'une balise mobile intégré à un SLM. Le système mis en place a permis de réduire la dérive des trajectoires observées et de produire des nuages de points géoréférencés de bonne qualité. Nous avons montré dans ce travail que l'incertitude des observations du système proposé de trilatération ultrasonore est d'ordre centimétrique. De plus, les trajectoires produites ne présentent pas de dérive et les observations données par les balises mobiles du système maintiennent une bonne qualité pour l'ensemble d'un levé. La qualité du nuage de points résultant a été mesurée par rapport à un nuage de points de référence. Les écarts sont uniformes pour l'ensemble d'un levé et ne dépassent pas 4 mm sur 67% de la zone. Les objectifs de cette recherche ont donc été atteints. Cela nous permet d'affirmer que la trilatération ultrasonore est une solution viable pour améliorer les trajectoires d'un SLM et réduire leurs dérives dans un environnement intérieur.

Les contributions de ce travail sont les suivantes :

- Sélection et évaluation d'un système de positionnement basé sur la trilatération ultrasonore et son intégration avec un SLM intérieur : le système de positionnement Marvelmind a été intégré pour la première fois à un SLM via l'environnement ROS, améliorant la qualité de la trajectoire produite par ce SLM dans un environnement intérieur. Un tel système va permettre de tirer profit du réseau de points de contrôle présent dans les tunnels miniers souterrains et d'effectuer ainsi le suivi des travaux d'excavation en visualisant les nuages de points à chaque étape des travaux. Nous pouvons par la suite faire des modélisations 3D, des calculs de cubature, des profils topométriques, etc.
- Réduction de la dérive au niveau des trajectoires du SLM : le système intégré a permis d'avoir des trajectoires sans dérive en comparaison avec celles produites par un scanner LiDAR muni d'une IMU et d'un algorithme de traitement ICP.

- Production de nuages de points géoréférencés acquis dans des espaces intérieurs : pour produire un nuage de points géoréférencé dans un tunnel minier, un scanneur statique nécessite une acquisition en plusieurs étapes : levée de points de contrôle, installation des sphères ou des cibles réfléchissantes entre chaque station d'acquisition, calage et géoréférencement. Il s'agit donc d'un processus coûteux en temps et en argent. En revanche, le système intégré que nous proposons permet de produire un nuage de points géoréférencé en minimisant le temps d'acquisition et sans nécessité d'une étape de post-traitement.

De plus, pour atteindre nos objectifs de recherche et rendre les différents traitements et analyses de qualité plus efficaces, nous avons également mis en place des scripts en langage Python pour automatiser la lecture des données, l'affichage des trajectoires et le calcul d'indicateurs de performance. Des exemples de ces fonctions sont présentés en annexe.

Même si le présent travail a permis de mettre en place pour la première fois une technique de positionnement intérieur intégrant un SLM et un système de trilatération ultrasonore et de générer des trajectoires sans dérive avec laquelle des nuages de points géoréférencés de qualité sont produites, d'autres développements, adaptations et tests dans les milieux miniers souterrains sont à faire. Parmi les pistes de recherche potentielles à développer dans de futurs travaux, nous pensons d'abord à l'utilisation de balises permettant la transmission de fréquences multiples. Les balises utilisées dans ce travail ont une fréquence unique de 37 kHz. L'utilisation d'une seule fréquence présente une limite sur le taux de rafraîchissement des balises mobiles et par conséquent sur la quantité des observations acquises. Un nombre d'observations plus important implique une meilleure estimation de la position. De plus, l'utilisation des balises monofréquences est sensible à la présence de bruits et des erreurs systématiques tel que l'effet multi-trajet. Les balises multifréquences constituent une solution potentielle à ces inconvénients. En effet, si le mobile utilise plusieurs fréquences simultanément, le nombre d'observations sera plus élevé et l'incertitude du système ainsi que sa robustesse s'amélioreront. Nous estimons donc que l'intégration des balises multifréquences, notamment celles qui ont été rendues disponibles par la compagnie Marvelmind vers la fin de ce projet de recherche, est une piste d'amélioration pertinente.

Par ailleurs, les trajectoires produites par la balise mobile du système intégré n'ont subi aucun prétraitement ou filtrage avant leur diffusion vers le scanner LiDAR. Comme ces données peuvent être entachées d'erreurs d'observations aléatoires, il serait donc intéressant d'appliquer des méthodes de filtrages sur ces mesures. Le développement d'un filtre de Kalman étendu pourrait donc être réalisé et les observations filtrées par ce filtre analysées.

De plus, les différentes expérimentations réalisées avec la technologie Marvelmind dans le cadre de ce projet nous ont permis de constater des limites lors du passages d'une zone de service à la suivante. Le comportement du système Marvelmind lors de cette transition de zones de service doit être mieux exploré dans le but de configurer les balises fixes de façon plus optimale.

Également, même si la technologie Marvelmind est en mesure de fournir un positionnement 3D nous avons dû laisser de côté la coordonnée Z en raison de son instabilité. Tous les tests effectués n'ont pas été en mesure d'obtenir des valeurs précises en Z. Nous croyons que l'installation des balises fixes au plafond au lieu de la partie supérieure des murs pourrait améliorer ce problème. Nous recommandons donc de faire des tests supplémentaires en installant les balises fixes au plafond pour vérifier cette hypothèse.

Finalement, même si le système mis en place a été testé dans le corridor du campus de l'Université Laval et dans le laboratoire de métrologie, les conditions d'acquisition dans un tunnel minier souterrain, à savoir le gradient de température, la présence importante de poussière, le bruit émanant des engins en circulation, sont très différentes des environnements où nos expérimentations ont été conduites. Par conséquent, nous considérons nécessaire de mener des tests supplémentaires au sein des tunnels d'une mine souterraine en exploitation, pour valider la méthodologie d'acquisition proposée.

Ce projet de recherche de maîtrise a permis d'évaluer de façon rigoureuse un système de positionnement intérieur basé sur la trilatération ultrasonore. Celui-ci a montré son potentiel à réduire la dérive des trajectoires d'un SLM suite à son intégration. Le système intégré a également rendu possible la production de nuages de points géoréférencés. On peut affirmer que la trilatération ultrasonore est une solution viable pour améliorer les trajectoires d'un

SLM et réduire leur dérive dans un environnement intérieur. L'intégration de la trilatération ultrasonore à un SLM intérieur a donc le potentiel d'améliorer la qualité des nuages de points.

Bibliographie

- Al-Ammar, M. A., Alhadhrami, S., Al-Salman, A., Alarifi, A., Al-Khalifa, H. S., Alnafessah, A., & Alsaleh, M. (2014). Comparative Survey of Indoor Positioning Technologies, Techniques, and Algorithms. *2014 International Conference on Cyberworlds*, 245–252. <https://doi.org/10.1109/CW.2014.41>
- Amsters, R., Stevens, N., Lauwers, Q., Demeester, E., & Slaets, P. (2019). *Evaluation of Low-Cost/High-Accuracy Indoor Positioning Systems*. 6.
- Bai, Y. B., Wu, S., Retscher, G., Kealy, A., Holden, L., Tomko, M., Borriak, A., Hu, B., Wu, H. R., & Zhang, K. (2014). A new method for improving Wi-Fi-based indoor positioning accuracy. *Journal of Location Based Services*, 8(3), 135–147. <https://doi.org/10.1080/17489725.2014.977362>
- Besl, P. J., & McKay, N. D. (1992). A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2), 239–256. <https://doi.org/10.1109/34.121791>
- Birk, A., & Pfingsthorn, M. (2016). *Simultaneous Localization And Mapping (SLAM)*. 41.
- Chow, J. C. K. (2017). Drift-Free Indoor Navigation Using Simultaneous Localization And Mapping Of The Ambient Heterogeneous Magnetic Field. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W7*, 339–344. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W7-339-2017>
- Deng, Z., Zou, D., Huang, J., Chen, X., & Yu, Y. pei. (2009). The Assisted GNSS Boomed Up Location Based Services. *2009 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/WICOM.2009.5303191>
- Deschênes, S.-P. (2021a). *Calibration_map_metrology*. https://github.com/simonpierredeschenes/calibration_map_metrology
- Deschênes, S.-P. (2021b). *Map_metrology*. https://github.com/norlab-ulaval/imu_odom/tree/map_metrology
- Deschênes, S.-P. (2021c). *Marvelmind_nav-release*. https://github.com/simonpierredeschenes/marvelmind_nav-release
- Frese, U., Wagner, R., & Röfer, T. (2010). A SLAM Overview from a User's Perspective. *KI - Künstliche Intelligenz*, 24(3), 191–198. <https://doi.org/10.1007/s13218-010-0040-4>
- Gu, Y., Lo, A., & Niemegeers, I. (2009). A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 11(1), 13–32. <https://doi.org/10.1109/SURV.2009.090103>

- Han, J.-Y., Chen, C.-S., & Lo, C.-T. (2014). Time-Variant Registration of Point Clouds Acquired by a Mobile Mapping System. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(1), 196–199. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2013.2252417>
- Heikki, L. (2004). *WLAN Location Methods Graduate Course Slides, University of Finland*. <http://www.comlab.hut.fi/opetus/333/2004slides/topic33.pdf>
- JCGM. (2012). *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)* (3rd ed.).
- Konecny, J., Prauzek, M., & Hlavica, J. (2016). ICP Algorithm in Mobile Robot Navigation: Analysis of Computational Demands in Embedded Solutions**This work was supported by the project SP2016/162, Development of algorithms and systems for control, measurement and safety applications II of Student Grant System, VSB-TU Ostrava. *IFAC-PapersOnLine*, 49(25), 396–400. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.12.079>
- Koyuncu, H., & Yang, S. H. (2010). *A Survey of Indoor Positioning and Object Locating Systems*. 9.
- Lague, D., Brodu, N., & Leroux, J. (2013). Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82, 10–26. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009>
- Liu, H., Darabi, H., Banerjee, P., & Liu, J. (2007). Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 37(6), 1067–1080. <https://doi.org/10.1109/TSMCC.2007.905750>
- Lynch, B. K., Marr, J., Marshall, J. A., & Greenspan, M. (2017). *Mobile LiDAR-based convergence detection in underground tunnel environments*. 12.
- Lyu-Han Chen, Wu, E. H.-K., Ming-Hui Jin, & Gen-Huey Chen. (2014). Intelligent Fusion of Wi-Fi and Inertial Sensor-Based Positioning Systems for Indoor Pedestrian Navigation. *IEEE Sensors Journal*, 14(11), 4034–4042. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2330573>
- Mainetti, L., Patrono, L., & Sergi, I. (2014). A survey on indoor positioning systems. *2014 22nd International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, 111–120. <https://doi.org/10.1109/SOFTCOM.2014.7039067>
- Marvelmind, robotics. (2020). *Marvelmind navigation system manual*. https://marvelmind.com/pics/marvelmind_navigation_system_manual.pdf
- Mautz, R. (2009). Overview of current indoor positioning systems. *Geodesy and Cartography*, 35(1), 18–22. <https://doi.org/10.3846/1392-1541.2009.35.18-22>

- Mautz, R. (2012). *Indoor positioning technologies* [Application/pdf]. 1 Band. <https://doi.org/10.3929/ETHZ-A-007313554>
- Merz, R., Chastellain, F., Botteron, C., & Blatter, A. (2008). *An Experimental Platform for an Indoor Location and Tracking System*. 11.
- NorLab. (2021). *Norlab ICP mapper*. https://github.com/norlab-ulaval/norlab_icp_mapper/tree/map_metrology
- Peng, J., Zhu, M., & Zhang, K. (2011). New Algorithms Based on Sigma Point Kalman Filter Technique for Multi-sensor Integrated RFID Indoor/Outdoor Positioning. *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, 4.
- Perosanz, F. (2019). GNSS: A revolution for precise geopositioning. *Comptes Rendus Physique*, 20(3), 171–175. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2019.05.018>
- Popović, D. (2021). *Indoor location technologies – Review*. https://www.academia.edu/19716274/Indoor_location_technologies_An_Overview
- Ptak, M., Podolska, P., & Podolski, R. (2018). Challenges for science: The exploitation of deep deposits. *E3S Web of Conferences*, 71, 00008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20187100008>
- Raspberry Pi. (2021). *Raspberry Pi 3 Model A+*. <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-a-plus/>
- Rizos, C., Roberts, G., Barnes, J., & Gambale, N. (2010). *Locata: A new high accuracy indoor positioning system*. 7.
- robosense. (2021). *RS-LiDAR-16 Product Specifications*. <https://www.robosense.ai/en/rslidar/RS-LiDAR-16>
- Vaidis, M., Laconte, J., Kubelka, V., & Pomerleau, F. (2020). Improving the Iterative Closest Point Algorithm using Lie Algebra. *ArXiv:2010.11160 [Cs]*. <http://arxiv.org/abs/2010.11160>
- Ward, A., Jones, A., & Hopper, A. (1997). A new location technique for the active office. *IEEE Personal Communications*, 4(5), 42–47. <https://doi.org/10.1109/98.626982>
- xsens. (2021). *Mti 10-series Specifications*. <https://www.xsens.com/products/mti-10-series>
- Yao, L., Wu, Y.-W. A., Yao, L., & Liao, Z. Z. (2017). An integrated IMU and UWB sensor based indoor positioning system. *2017 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/IPIN.2017.8115911>

Annexes

A1. Exemple d'une fonction développée en langage Python pour l'analyse des trajectoires aller, retour et en boucle acquises par le système Marvelmind et par la station totale

La fonction groupe les coordonnées (X et Y) de chaque trajectoire (Marvelmind et station totale) en 25 intervalles et calcule ensuite la moyenne des écarts entre les deux trajectoires pour chaque intervalle.

```
def plot_diff(direc, f1, f2, y_step) :  
    df = pd.read_csv(os.path.join(base_dir, direc, f1), sep=',', names=range(20), skiprows=2)  
    df = df[df[2]==5]  
    df = df[df[4]>y_step]  
    x, y = df[3].values, df[4].values  
    x_max = np.max(x)  
    y_max = np.max(y)  
    df_ts = pd.read_csv(os.path.join(base_dir, direc, f2), sep=';', header=None)  
    df_ts2 = df_ts[df_ts[1]<= x_max]  
    df_ts2 = df_ts2[df_ts2[2]<=y_max][df_ts2[2]>y_step]  
    x_ts, y_ts = df_ts2[1].values, df_ts2[2].values  
  
    intervals = np.linspace(np.min(x_ts), np.max(x_ts), num=25)  
    intervals_y = np.linspace(np.min(y), np.max(y), num=25)  
    diff_x = []  
    diff_y = []  
    for i in range(len(intervals)-1) :  
        a = x[np.where((x <= intervals[i+1]) & (x > intervals[i]))]  
        b = x_ts[np.where((x_ts <= intervals[i+1]) & (x_ts > intervals[i]))]  
        diff_x.append(abs(a.mean()-b.mean()))  
  
    for i in range(len(intervals_y)-1) :  
        a = y[np.where((y <= intervals_y[i+1]) & (y > intervals_y[i]))]  
        b = y_ts[np.where((y_ts <= intervals_y[i+1]) & (y_ts > intervals_y[i]))]  
        diff_y.append(abs(a.mean()-b.mean()))  
  
    return
```

Cette fonction a permis de produire les résultats qui ont servi à conduire l'analyse de la section 3.5.6.

A2. Exemple d'une fonction développée en langage Python pour l'analyse des données de la trajectoire ICP et celle de Marvelmind

La fonction qui calcule la moyenne des distances tous les 5 secondes est présentée ci-dessous. Elle prend en entrée les deux trajectoires obtenues par Marvelmind et par ICP et trace la distribution des distances moyennes sur des intervalles de 5 secondes.

```
def interval(df_union1, df_union2) :  
  
    df_union1['t'] = df_union1.index  
    df_union1['t2'] = df_union1['t'].apply(lambda x: math.floor(x/5))  
    df_mean1 = df_union1.groupby("t2").mean()  
    ts1 = df_mean1.index.to_numpy().reshape(len(df_mean1), 1)  
  
    df_union2['t'] = df_union2.index  
    df_union2['t2'] = df_union2['t'].apply(lambda x: math.floor(x/5))  
    df_mean2 = df_union2.groupby("t2").mean()  
    ts2 = df_mean2.index.to_numpy().reshape(len(df_mean2), 1)  
  
    fig3, ax3 = plt.subplots(1, 1, figsize=(10,7))  
    ax3.bar(ts2[:, 0], df_mean2["distance"].to_numpy().reshape(len(df_mean2), 1).flatten(), 0.5, color="orange")  
    ax3.set_ylabel("Moyenne des distances sur 5 s en m", fontsize= 15)  
    ax3.set_xlabel("Intervalle de 5 s", fontsize= 15)  
    ax3.xaxis.set_ticks(ts1[:, 0])  
    #ax3.set_title('Moyenne des distances 2D sur 5 s en m dans la deuxième configuration')  
    ax3.legend()  
    plt.xticks(fontsize= 15)  
    plt.yticks(fontsize= 15)  
    fig3.show()
```

Cette fonction a servi à produire la Figure 4.10