



**HAL**  
open science

# Etude de la technologie SLAM du Backpack de Leica et optimisation de la chaine de traitement des données 3D

Moussa Diomande

► **To cite this version:**

Moussa Diomande. Etude de la technologie SLAM du Backpack de Leica et optimisation de la chaine de traitement des données 3D. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2023. dumas-04410437

**HAL Id: dumas-04410437**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04410437v1>**

Submitted on 22 Jan 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS  
ECOLE SUPERIEURE DES GEOMETRES ET TOPOGRAPHES

---

**MEMOIRE**

**présenté en vue d'obtenir**

**le DIPLOME D'INGENIEUR CNAM**

**SPECIALITE : Géomètre et Topographe**

**par**

**Moussa DIOMANDE**

---

Etude de la technologie SLAM du Backpack de Leica et optimisation de la  
chaîne de traitement des données 3D

**Soutenu le 05 Septembre 2023**

---

**JURY**

Monsieur Stéphane DURAND

Président du jury

Monsieur Maxime MOST

Maître de stage

Monsieur Florent AUTHIE

Tuteur de stage

Monsieur José CALI

Enseignant référent

## Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers mon maître de stage, M. Maxime MOST, ainsi que ses associés, M. François BOTTRAUD et M. Jonatana ROSOLOFONOMENJANAHARY, pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser ce travail de fin d'études. Mes remerciements spéciaux vont à M. Florent AUTHIE, mon tuteur de stage, pour ses conseils avisés et ses remarques constructives qui ont été d'une grande aide. J'exprime ma reconnaissance envers toute l'équipe de Bbass pour leur accueil, leur bienveillance et leurs encouragements constants.

Je remercie chaleureusement M. CALI José, mon professeur référent, ainsi que l'équipe pédagogique de l'ESGT, pour leur soutien durant ces trois années de formation.

Mon appréciation va également à M. Jakub Novotny, ingénieur "Assistance Technique" chez Leica Geosystems SAS, pour ses précieuses contributions et son expertise partagée.

Enfin, à ma famille, je veux dire combien je suis reconnaissant de votre soutien inconditionnel. Tout ce que j'ai accompli jusqu'ici est le fruit de votre amour et de votre soutien indéfectible. Votre présence est ma plus grande source d'inspiration et d'encouragement.

## Glossaire

GCP	Ground Control Points, ce sont des points de référence au sol utilisés pour contrôler la qualité du nuage de points.
ICP	Iterative Closest Point, c'est un algorithme utilisé dans le but de mettre en correspondance deux jeux de données, le plus souvent des nuages de points.
LCPO	Leica Cyclone Pegasus Office
LPB	Leica Pegasus Backpack
LPM	Leica Pegasus Manager
MMS	Mobile Mapping Systems (Système de Cartographie Mobile)
IE	Novatel Inertial Explorer
PDOP	Position Dilution of Precision, c'est un indicateur utilisé dans les systèmes GNSS pour mesurer la géométrie des satellites en vue
RGP	Réseau GNSS permanent
SIG	Systèmes d'Information Géographique, ce sont des outils informatiques qui permettent de recueillir, de stocker, de gérer, d'analyser et de visualiser des données géographiques
TFE / PFE	Travail de Fin d'Etudes / Projet de Fin d'Etudes
Walk	Intervalle de temps pendant lequel la donnée du scanner (nuage de points et photos) est effectivement enregistré. Un Walk correspond donc à une portion du nuage de points. Faire des walks permet de réduire la taille finale du projet (on enregistre que ce qui est utile) et à la fin du traitement, on se retrouve avec des segments de nuage de points, beaucoup plus simple à manipuler
ZUPT	Zero Velocity Update, c'est une mise à jour de la vitesse à zéro effectuée périodiquement pour corriger les erreurs accumulées dans les mesures de position, contribuant ainsi à améliorer la précision et la stabilité des systèmes de localisation.

# Table des matières

<b>Remerciements .....</b>	<b>2</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>5</b>
<b>I. Etat de l'art.....</b>	<b>6</b>
<b>I.1 Les systèmes lidar dynamiques .....</b>	<b>6</b>
I.1.1 Généralités.....	6
I.1.2 Calcul de la trajectoire.....	6
<b>I.2 Le Leica Pegasus Backpack .....</b>	<b>10</b>
I.2.1 Présentation générale.....	10
I.2.2 Bilan de l'étude qualitative réalisée sur le Backpack.....	11
I.2.3 Comparaison du LPB avec d'autres systèmes existants sur le marché .....	11
<b>I.3 Etat des connaissances en matière de logiciels d'exploitation de nuage de points issu d'un MMS .....</b>	<b>12</b>
I.3.1 Logiciels de calcul.....	12
I.3.1 Logiciels de DAO.....	13
<b>II. Etude de la phase d'acquisition terrain .....</b>	<b>13</b>
<b>II.1 A l'extérieur .....</b>	<b>14</b>
II.1.1 Présentation du protocole expérimental .....	14
II.1.2 Phase d'acquisition des données .....	15
II.1.3 Traitement des données .....	16
II.1.4 Résultats et analyses.....	19
II.1.5 Conclusion.....	25
<b>II.2 A l'intérieur.....</b>	<b>26</b>
II.2.1 Présentation du protocole expérimental et de la zone d'étude .....	26
II.2.2 Phase d'acquisition des données .....	27
II.2.3 Traitement des données .....	27
II.2.4 Résultats et analyses.....	28
II.2.5 Conclusion.....	33
<b>II.3 Bilan .....</b>	<b>33</b>
<b>III. Analyse et optimisation de la chaine de production de plan.....</b>	<b>34</b>
<b>III.1 Etude de la chaine actuelle.....</b>	<b>35</b>
III.1.1 Logiciel utilisé et méthodologie de dessin .....	35
III.1.2 Les limites de la méthode traditionnelle .....	36
<b>III.2 Etude de logiciels pouvant être intéressant pour l'étude .....</b>	<b>36</b>
III.2.1 Etude des solutions choisies .....	36

<b>III.3 Conclusion .....</b>	<b>40</b>
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>42</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>43</b>
<b>Table des annexes .....</b>	<b>45</b>
<b>Liste des figures .....</b>	<b>45</b>
<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>46</b>
<b>Annexes .....</b>	<b>46</b>

# INTRODUCTION

Le géomètre-expert joue un rôle crucial dans la planification, la conception et la réalisation de projets d'infrastructures majeurs dans son environnement. La réalisation d'une telle tâche requiert la collecte précise de données géographiques sur le terrain. Cependant, l'augmentation constante de la demande en informations géographiques ainsi que la croissance des projets ont rendu difficile le suivi efficace avec les méthodes traditionnelles de collecte de données telles que les stations totales ou les scanners statiques. Face à cette situation, les scanners lidar dynamiques ont émergé, offrant une numérisation exhaustive plus rapide que les équipements traditionnels.

Le cabinet Bbass, se voulant toujours à la pointe des nouvelles technologies pour satisfaire ses clients, a adopté en 2020 un scanner dynamique Pegasus Backpack de Leica Geosystems. Ce scanner compact est porté par un opérateur et permet de réaliser facilement des relevés extérieurs et intérieurs. Le Leica Pegasus Backpack (LPB) est équipé de nombreux capteurs et technologies qui lui permettent de déterminer sa trajectoire de deux manières distinctes : par géoréférencement direct ou par le biais du SLAM (Simultaneous Localization and Mapping).

Cependant, les premières utilisations du scanner ont révélé des limites dans le calcul de trajectoire par géoréférencement direct, particulièrement en matière de précision attendue (3 à 5 cm en extérieur). Le cabinet a en effet, constaté qu'il était difficile d'atteindre cette précision dans les zones où la couverture GNSS est limitée, à moins de disposer des points de calage sur le terrain. Or cette étape requiert beaucoup de temps.

Un premier travail de fin d'études [HACHARD, 2022] a permis d'optimiser la pose des points de calage sur le terrain, mais n'a pas permis de s'en affranchir. Actuellement, la trajectoire du scanner est calculée par géoréférencement direct dépendant du signal GNSS. Cependant, tel qu'il a été dit plus haut, le scanner intègre également le SLAM, une technique de calcul de trajectoire indépendante du GNSS.

Dans ces conditions, on peut alors se demander : l'intégration du SLAM dans le calcul de la trajectoire du Leica Pegasus Backpack peut-il dispenser de la pose de points de calage pendant la phase d'acquisition ?

Une autre limite du Pegasus Backpack réside dans le fait que le temps gagné lors de la collecte des données sur le terrain est largement dissipé lors du traitement et de l'exploitation ultérieurs de ces données au bureau. Le processus actuel de traitement est très chronophage.

En somme, cette étude se penche sur l'intégration du SLAM dans le calcul de la trajectoire du Leica Pegasus Backpack, en examinant sa capacité à se substituer à la pose de points de calage lors de la collecte de données en extérieur. Elle se propose également d'étudier les performances du calcul SLAM du Pegasus Backpack dans le cadre d'un relevé d'intérieur. Par ailleurs, cette recherche vise à améliorer le processus de traitement ultérieur des données collectées, en passant en revue les logiciels disponibles et en réalisant des tests sur le logiciel ayant de forts potentiels vis-à-vis de notre objectif.

# **I. Etat de l'art**

Ce chapitre sera scindé en trois parties. La première introduira de manière succincte les systèmes dynamiques d'acquisition 3D par lidar et mettra un accent particulier sur leur fonctionnement au travers des éléments et technologies qui les composent. La seconde partie sera quant à elle, dédiée à la présentation de l'instrumentation qui fait l'objet de cette étude. Enfin, la dernière partie va être consacrée aux logiciels de dessin sur un nuage 3D.

## **I.1 Les systèmes lidar dynamiques**

### **I.1.1 Généralités.**

Les scanners lidar dynamiques, également appelés « Mobile Mapping System (MMS) », sont des dispositifs de numérisation 3D qui utilisent des capteurs lidar pour cartographier leur environnement tout en se déplaçant grâce à un vecteur de déplacement [Mansour, 2014]. Ces MMS, développés depuis les années 90, ont révolutionné de nombreux secteurs, notamment celui des géomètres experts. Ils se distinguent par leur rapidité et leur exhaustivité dans les relevés. En effet, comparés aux scanners statiques, ils permettent de documenter une zone beaucoup plus étendue en un temps réduit. Toutefois, cette rapidité d'acquisition est souvent accompagnée par une perte de précision et un temps de traitement plus long en fonction des caractéristiques du chantier.

Pour assurer l'assemblage des points acquis lors du relevé, le scanner dynamique doit être capable de déterminer sa position tout au long de l'acquisition. Cela nécessite l'utilisation de différents capteurs et technologies, qui seront abordés dans le chapitre suivant. Selon la méthode de calcul de trajectoire utilisée, un MMS peut être utilisé pour des relevés d'intérieur, d'extérieur, voire les deux simultanément.

Les scanners dynamiques peuvent être classés en deux catégories en fonction de leur poids et du type de vecteur de déplacement utilisé comme le souligne [DESCHATRETTE, 2017]. On distingue ainsi les MMS lourds, nécessitant des véhicules tels que des camions, des pick-up ou des voitures, et les MMS légers. Les MMS légers comprennent les scanners de type trolley, utilisant un chariot, les scanners backpack portés sur le dos comme un sac à dos, ainsi que les scanners à main. Les MMS sont utilisés pour alimenter les bases de données des SIG, créer des modèles numériques, suivre les projets routiers et générer des plans précis de voirie, de situation, de façade et d'intérieur.

### **I.1.2 Calcul de la trajectoire**

Sur un marché où les scanners lidar dynamiques se veulent de plus en plus concurrents des scanners fixes en termes de précision, le calcul de la trajectoire devient un élément critique car celui-ci exerce une influence considérable sur la précision finale du levé.

Pour pouvoir se localiser, les scanners dynamiques font appel à différentes technologies tels que le géoréférencement direct ou le SLAM. Voyons en quoi ceux-ci consistent.

#### **I.1.2.1 Le géoréférencement direct**

Afin de pouvoir exprimer les points relevés dans un repère de référence, en l'occurrence le repère terrain, le MMS doit être capable de connaître sa position et son orientation en tout point

de sa trajectoire. Cela nécessite donc de trouver une relation entre le repère du capteur et ledit repère de référence lors de l'acquisition. On parle alors de géoréférencement direct.

Ce système est constitué d'un couplage entre un récepteur GNSS bi-fréquentiel et une centrale inertielle (IMU). L'antenne GNSS fournit une position absolue tridimensionnelle géocentrique du système à partir d'observations satellitaires. Cependant, elle fournit la position de manière discontinue et aussi dans les zones à masque, il peut y avoir de longues interruptions de signal. La centrale inertielle quant à elle, est constituée de 3 accéléromètres et de 3 gyromètres disposés orthogonalement sur ses trois axes de référence et qui lui permettent d'obtenir la vitesse et l'orientation de MMS et donc une position relative. Son inconvénient est qu'elle est soumise à une forte dérive temporelle. Il devient évident que, seul, aucun de ces deux capteurs n'est suffisamment robuste pour indépendamment localiser de manière fiable le système [DESCHATRETTE, 2017]. C'est pour pallier leurs défauts respectifs que leurs données sont intégrées puis fusionnées à l'aide d'un filtre de Kalman [MAMBOU KUIPOU, 2016] dans le but d'avoir position et orientation fiables tout au long de l'acquisition.

Le modèle mathématique qui lie les deux repères est exprimé par l'équation de géoréférencement direct suivante inspirée de [VALLET, 2011] et illustré par la figure 1 :

$$X_P^E = X_{IMU}^E + R_{IMU}^E \cdot R_{ALS}^{IMU} \cdot (b_{IMU}^{ALS} + X_P^{ALS}) \quad (e.1)$$

$$X_{IMU}^E = X_{GNSS}^E + R_{IMU}^E \cdot b_{GNSS}^{IMU} \quad (e.2)$$

- Avec :
- $X_P^E$  : Position du point P dans le référentiel terrain (E)
  - $X_{IMU}^E$  : Position du centre de navigation de l'IMU dans E
  - $X_{GNSS}^E$  : Position du GNSS dans le repère E
  - $X_P^{ALS}$  : Position du point P dans le référentiel associé au lidar (ALS)
  - $R_{IMU}^E$  : Matrice de rotation entre les référentiels IMU et terrain (E)
  - $R_{ALS}^{IMU}$  : Matrice de rotation entre les repères IMU et lidar (ALS)
  - $b_{IMU}^{ALS}$  : Bras de levier entre IMU et lidar dans le repère ALS
  - $b_{GNSS}^{IMU}$  : Bras de levier entre IMU et GNSS dans le repère IMU

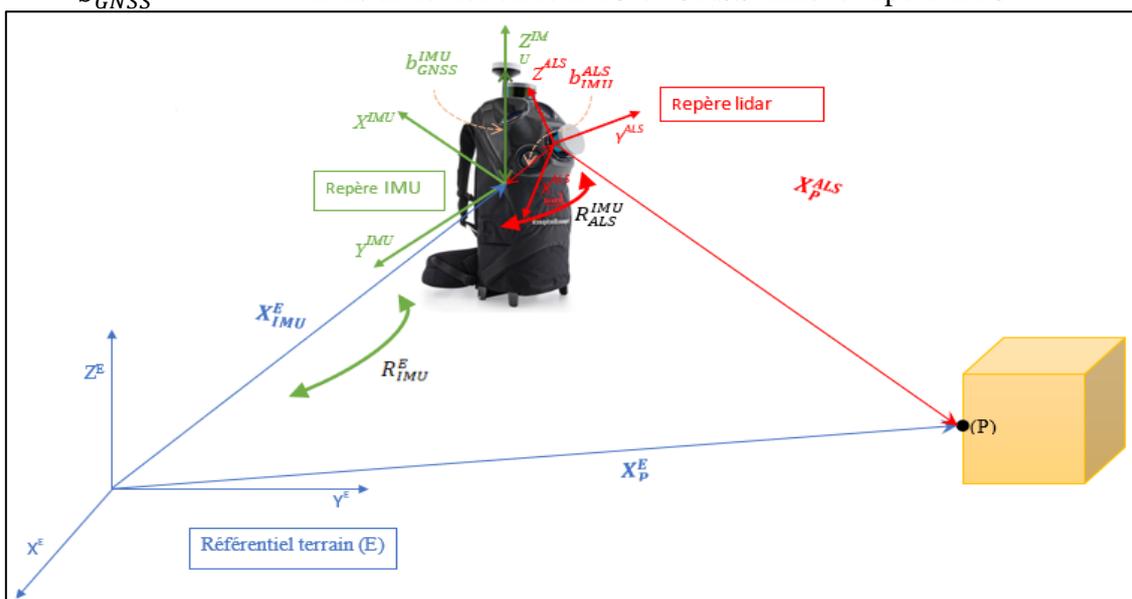


Figure 1 : Principe du géoréférencement direct de la visée laser. [D. Moussa]

En plus des capteurs précédemment cités, d'autres capteurs tel qu'un odomètre (qui mesure la distance parcourue par le véhicule) peuvent être ajoutés au système afin d'améliorer le calcul de la trajectoire.

## **I.1.2.2 La technologie SLAM**

### **I.1.2.2.1 Généralités**

À l'origine développée dans le but de faciliter la localisation dans l'espace et la navigation des robots domestiques ou des véhicules autonomes, la technologie du SLAM s'est rapidement répandue dans le domaine de la cartographie mobile. À première vue, le problème du SLAM semble être d'une complexité considérable, voire énigmatique. En effet, avec le SLAM, on exige d'un système placé dans un environnement inconnu qu'il crée simultanément une carte de cet environnement tout en se localisant à l'intérieur de cette carte. Cette situation rappelle fortement le "paradoxe de l'œuf et de la poule", comme le souligne [NARAYANA, 2011]. Afin de résoudre cette boucle de dépendance, les chercheurs ont entrepris de résoudre simultanément ces deux problématiques, à savoir la localisation et la cartographie. C'est ainsi qu'est née l'approche du SLAM, abréviation de « Simultaneous Localization and Mapping » (Localisation et Cartographie Simultanées). Une revue exhaustive et un historique des différentes recherches menées sur le SLAM ont été réalisés par [ABOUZAHIR, 2017] dans le cadre de sa thèse. Cette technologie s'avère extrêmement précieuse dans les zones où le signal GNSS est médiocre voire indisponible. C'est d'ailleurs pour cette raison qu'elle est largement utilisée en cartographie, notamment pour les relevés d'intérieur.

### **I.1.2.2.2 Fonctionnement du SLAM**

Un amer en robotique est un point de repère ou un repère visuel utilisé par un robot pour se localiser et naviguer dans son environnement. Il peut prendre la forme d'un objet physique, d'une marque spécifique, d'un élément géométrique particulier ou d'une caractéristique distinctive de l'environnement.

Le système placé dans un environnement à une position initiale (à l'instant  $t_1$ ) identifie la position des amers de la scène à l'aide des données issues des différents capteurs embarqués (caméra, lidar, etc.). A partir de ces observations, le SLAM construit une première carte approximative de l'environnement et une première estimation de la position du système mobile.

Ensuite, lorsque le système se déplace à la position suivante (à l'instant  $t_2$ ), de nouvelles observations sont réalisées. En s'aidant de ces observations et des précédentes estimations, la technologie SLAM identifie à nouveau les amers de la scène puis les compare aux amers précédemment identifiés. Pour réaliser cette étape, le SLAM utilise les algorithmes ICP. La position actuelle du système (à  $t_2$ ) est alors estimée. Cette nouvelle estimation est meilleure que la première puisque le SLAM dispose de beaucoup plus de données. La carte de l'environnement est par la suite mise à jour à son tour.

Cette procédure est répétée pour chaque nouvelle position, permettant ainsi de tracer la trajectoire du robot et de créer une carte complète de la scène comme l'indique la figure 2.

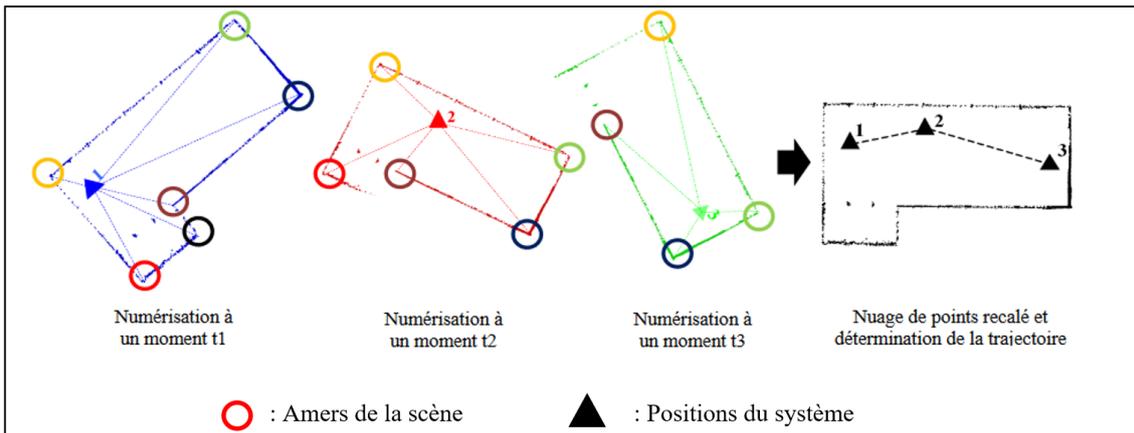


Figure 2 : Schéma conceptuel du fonctionnement du SLAM [DESCHATRETTE, 2017]

Le SLAM est cependant une technologie très sensible à de nombreux facteurs environnementaux de la scène. En effet, les environnements dynamiques, en constante évolution ou encore avec des personnes ou objets mobiles (tel que dans les gares, centres commerciaux, etc.) peuvent entraîner de fortes perturbations dans la construction d'une carte fiable par l'algorithme SLAM. Il en est de même pour les scènes sans caractéristiques géométriques distinctes tels que les tunnels, les longs couloirs ou grands espaces ouverts mais aussi, pour les environnements non structurés tels que la forêt, les champs, etc. Les contraintes liées au SLAM sont davantage développées dans la section 7 de [TRUN et al., 2005]. A ces contraintes, il faut rajouter la fermeture de boucle qui a une grande importance dans le processus SLAM [ABOUZAHIR, 2017]. En effet, la fermeture de boucle est nécessaire dans le SLAM pour améliorer la qualité de la carte et de la localisation en corrigeant la dérive par la comparaison des observations récentes à la carte existante. Des détails plus approfondis sur le SLAM peuvent être trouvés dans la thèse de [BAIG, 2012].

### I.1.2.2.3 Différentes méthodes et approches du SLAM

Cette section s'inspire principalement du mémoire de [CARREAUD, 2020]. Ce mémoire présente deux approches existantes pour résoudre le problème du SLAM : l'approche par filtrage, également connue sous le nom de SLAM probabiliste, et l'approche par graphe, appelée Graph-based SLAM. Cependant, dans le cadre de notre travail, nous nous concentrons sur la présentation des différentes méthodes utilisées pour mettre en œuvre la technologie SLAM, telles qu'elles sont décrites dans ledit mémoire. Ces méthodes peuvent être regroupées en fonction des données utilisées en entrée de l'algorithme. Ainsi, nous distinguons les catégories suivantes :

- **Le SLAM Visuel** qui utilise des données provenant d'une caméra RGB pour extraire les informations visuelles de la scène. C'est la méthode la plus utilisée car elle est flexible et compatible avec des capteurs peu coûteux comme des caméras embarquées sur les drones
- **Le SLAM RGB-D** est une version améliorée du SLAM visuel, qui intègre des données des caméras (RGB) et des capteurs de profondeur pour mesurer la distance (D) entre l'objet et le scanner. L'utilisation de la profondeur renforce la détection des objets, la compréhension de la géométrie de l'environnement et permet de réduire les problèmes d'occlusion.
- **Le SLAM Lidar pur** est, comme son nom l'indique, une approche du SLAM qui utilise exclusivement les informations de distances mesurées à l'aide de capteurs lidar pour

construire la carte de la scène et se localiser dans cette scène. C'est une méthode qui fonctionne indépendamment des conditions d'éclairage de la scène.

- **Le SLAM Lidar et IMU** est une méthode qui utilise une combinaison de données issues de capteurs lidar et d'une unité de mesure inertielle pour réaliser la cartographie et la localisation simultanées. L'ajout d'une centrale inertielle vient corriger les erreurs de positionnement accumulées par le SLAM pur et aussi compenser certaines de ses failles telle que l'incapacité de détecter les surfaces réfléchissantes ou transparentes. Cette association rend, en somme, l'algorithme SLAM plus précis et plus robuste.

La grande majorité des MMS sur le marché et en particulier le Leica Pegasus Backpack utilisent essentiellement cette méthode de SLAM Lidar et IMU.

## I.2 Le Leica Pegasus Backpack

Après un aperçu du fonctionnement général des MMS, concentrons-nous désormais sur la présentation détaillée du Leica Pegasus Backpack, objet central de cette étude. Dans la suite, nous pourrions également faire référence à cet appareil en utilisant l'acronyme « LPB ».

### I.2.1 Présentation générale

Le Leica Pegasus Backpack est un scanner dynamique de type sac à dos qui embarque de nombreux capteurs et technologies de pointe, permettant à la fois acquisition de données et calcul de sa trajectoire. Les caractéristiques qui suivront proviennent de la fiche technique fournie par le constructeur.

Comme illustré par la figure 3, le LPB est équipé de deux scanners lidar de type *Dual Velodyne VLP-16* (16 faisceaux) capables d'acquérir chacun 600 000 points à la seconde à une fréquence de 10 Hz. Ces scanners acquièrent de la donnée à 360° avec un angle d'ouverture de 30° dans une plage utilisable de 50 m autour de l'appareil. Seul le scanner orienté dans le plan vertical et qui se situe au dos du LPB balaie des plans verticaux au fur et à mesure du déplacement afin de construire la carte de la scène. Les données du profilomètre horizontal situé au-dessus de l'appareil quant à elles, sont utilisées pour la calibration du système et la localisation par le SLAM. A ces capteurs lidar, s'ajoutent 5 caméras 2046 x 2046 pixels de focale 6 mm qui sont montées de manière à offrir une expérience panoramique immersive et aussi pour servir de support de colorisation du nuage de points. On décompte également une centrale inertielle et une antenne GNSS triple bandes et full constellations. La précision en position absolue de l'appareil annoncée par le constructeur est de 5 cm pour l'extérieur et de 5 à 50 cm<sup>1</sup> pour l'intérieur (avec le SLAM sans points de contrôle).

C'est un appareil très pratique du fait de sa mobilité et avec lequel on peut faire du relevé d'extérieur et d'intérieur. Pour le calcul de la trajectoire, on utilise idéalement le géoréférencement direct lors des levés d'extérieur et le SLAM pour les relevés d'intérieur.

---

<sup>1</sup> 5 cm à 50 cm pour 10 minutes de marche, 3 fermetures de boucles au minimum ou conditions de passes double.



Figure 3 : Composition du Leica Pegasus : Backpack [https://www.geodatadays.fr]

### I.2.2 Bilan de l'étude qualitative réalisée sur le Backpack

Comme indiqué dans l'introduction, [HACHARD, 2022] a réalisé en 2022, un TFE au sein du cabinet dans le but d'étudier la précision du backpack et de mettre en place une chaîne de production fiable dédiée au LPB. Son étude s'est focalisée sur la précision obtenue à l'issue d'un calcul de trajectoire par géoréférencement direct en fonction de la réception du signal GNSS. Il est sorti de ce PFE les points suivants :

- La précision en zones dégagées est conforme aux attentes (précision 3-5 cm en absolu)
- La précision des données en « zones masquées » n'est pas conforme aux attentes
- Pour garantir la précision, il faut donc judicieusement positionner des points de calages sur le terrain (environ tous les 10 mètres)
- Le logiciel testé *Cyclone 3DR*, est prometteur et pourrait réduire le temps consacré à la phase DAO du LPB.

### I.2.3 Comparaison du LPB avec d'autres systèmes existants sur le marché

Une diversité considérable de scanners dynamiques de type sac à dos est disponible sur le marché. Notre attention se portera sur quatre d'entre eux : le Leica Pegasus Backpack, le HERON MS Twin du fabricant italien Gexcel, le BMS3D-HD LD5+ de la société française Viametris et enfin le VLX de l'allemand NavVis. La figure en annexe 1 synthétise les caractéristiques de ces différents sacs à dos, en mentionnant les précisions annoncées par les fabricants.

Les scanners mentionnés, comme le Pegasus, sont équipés de deux capteurs lidar Velodyne pouvant acquérir jusqu'à 700 000 points par seconde. Ils intègrent également des caméras haute résolution pour la vue panoramique et la colorisation des points. Tous les scanners sont équipés d'une centrale inertielle. Seul le Leica Pegasus dispose systématiquement d'une antenne GNSS pour le géoréférencement direct. Les autres scanners backpack, axés sur les relevés d'intérieur, utilisent la technologie SLAM pour le calcul de la trajectoire et ne possèdent pas d'antenne GNSS, à l'exception du Viametris BMS3D-HD, où l'antenne GNSS est disponible en option, mais elle n'est pas utilisée pour le géoréférencement direct à proprement parler. Il s'agit plutôt en effet, de calculer la trajectoire par le SLAM, puis de contraindre cette trajectoire en ajoutant

les données du GNSS afin de l'ajuster et de géoréférencer le nuage [SALE, 2022]. Chaque constructeur propose son propre logiciel de traitement des données, nécessitant l'achat d'une licence.

Le choix de Bbass s'est porté sur le Leica Pegasus : Backpack pour diverses raisons. D'abord, le cabinet effectue de nombreuses missions de levé de linéaires routiers pour lesquelles la couverture GNSS est favorable. Dans de telles conditions, le LBP fournit de bons résultats et cela sans poser de cibles sur le terrain. Par ailleurs, le cabinet utilise déjà principalement du matériel de Leica. Cela peut donc faciliter les assistances et les révisions de l'appareil.

### **I.3 Etat des connaissances en matière de logiciels d'exploitation de nuage de points issu d'un MMS**

Cette partie finale de l'état de l'art vise principalement à mettre en évidence les logiciels variés qui sont utilisés pour le traitement des données brutes provenant du scanner dynamique, afin de les transformer en un nuage de points exploitable. De plus, il sera également abordé les logiciels de DAO qui jouent un rôle essentiel dans la création de livrables destinés aux clients.

#### **I.3.1 Logiciels de calcul**

Pour traiter les données issues du LPB, on se sert principalement du logiciel *Leica Pegasus Manager* (LPM) ou avec *Leica Cyclone Pegasus OFFICE* (LCPO). Chacun de ces deux logiciels est parallèlement couplé au logiciel *Inertial Explorer* (IE) pour déterminer la trajectoire par géoréférencement direct.

*Leica Pegasus Manager* (LPM) est un logiciel conçu par Leica Geosystems dans le but de traiter et analyser les données issues de famille de scanners dynamiques de Leica, à savoir les Leica Pegasus Two Ultimate, Swift et Backpack. Il contient de nombreux modules et fonctionnalités capables d'accomplir diverses tâches allant de la planification de la mission à la publication des livrables et en passant bien entendu par le traitement des données. C'est un excellent outil pour l'affichage, la visualisation et le contrôle du nuage de points et des images panoramiques issus du LPB. Ce logiciel offre une pléthore de paramétrages permettant de personnaliser et analyser le traitement, mais en raison de cette profusion de paramètres disponibles, sa prise en main peut être complexe et déroutante.

*Leica Cyclone Pegasus OFFICE* (LCPO) est un logiciel qui permet également le traitement des données du backpack. Il résulte de la volonté de fusion des logiciels de traitement de données de la suite de scanners dynamiques Pegasus de Leica Geosystems. C'est une version simplifiée et plus ergonomique et plus conviviale de LPM. Mais de ce fait, il est plus opaque que son prédécesseur et les possibilités de paramétrage sont restreints. Parmi les nouveautés, il automatise la détection de cibles de référence et les liens entre les parties du nuage, améliorant ainsi l'efficacité du traitement. Une caractéristique notable est l'option SLAM, qui permet un géoréférencement direct avec recalcul automatique d'un segment au SLAM, en cas de mauvaise qualité sur ce segment. Toutefois, son algorithme SLAM n'a évolué par rapport à celui de LPM.

*Novatel Inertial Explorer* (IE) est un logiciel développé par NovAtel et qui est essentiel dans le processus de traitement de la donnée du LPB. Il permet un calcul précis de la trajectoire par l'intégration étroitement couplée des données issues de l'antenne GNSS et de la centrale inertielle. IE dispose également de nombreux indicateurs de qualité (tels que le statut de IMU

+ GNSS lors du calcul, le PDOP, les séparations 3D et angulaire...) qui permettent d'évaluer la trajectoire calculée. Ces indicateurs sont abordés plus en détail dans l'annexe 1.

### **I.3.1 Logiciels de DAO**

Il existe de nombreux logiciels de DAO permettant de produire des livrables tels que des plans à partir du nuage de points obtenu grâce à un MMS. Bon nombre de ces logiciels ont été énumérés dans les travaux de [DESCHATRETTE, 2017] et de [HACHARD, 2022]. On peut néanmoins citer les logiciels suivants :

**Cloud2Map** commercialisé par Sogelink, est un logiciel de cartographie qui facilite la transformation de données 3D en cartes interactives. Il fusionne des fonctionnalités de dessin avec celles d'un système d'information géographique (SIG), permettant la création de plans DWG et d'exports SHP. La particularité de ce logiciel est qu'il dispose des fonctionnalités du logiciel de DAO *Autocad* de Autodesk et permet également la création d'une passerelle entre lui et la plupart des logiciels de traitement de données de scanners dynamiques sur le marché comme Leica Pegasus Manager, PPIMMS de Viametris, Insights360 de Cyclomedia etc. pour la production de plans. Son utilisation sera explorée dans la [section III.1](#).

**TerraScan** est une application propriétaire appartenant à la famille de logiciels de TerraSolid qui simplifie la gestion, l'analyse et la visualisation de données de scanners laser. Grâce à ses outils automatisés, elle accélère les tâches complexes et répétitive et intervient dans des applications telles que la création de modèles 3D de bâtiments, la détection de marquages routiers etc. Utilisée dans la cartographie, la modélisation urbaine et d'autres domaines, TerraScan supporte plusieurs formats d'import/export incluant LAS, LAZ et les formats binaires TerraScan.

**Orbit 3DM** appartenant à la société Bentley System, est un logiciel distribué en France et dans les pays francophones par TCract. Il englobe diverses solutions, notamment 3DM Content Manager et 3DM Feature Extraction. Le premier facilite la gestion et l'organisation des données lidar, s'adaptant efficacement aux volumes conséquents. En revanche, 3DM Feature Extraction offre des fonctionnalités pour extraire partiellement ou automatiquement certains éléments du nuage, tels que les éléments routiers et ferroviaires comme poteaux, panneaux de signalisation, arbres, bordures, glissières de sécurité, passages piétons, murs et clôtures. Cependant, [DELARIEU, 2019] souligne que ce logiciel est davantage axé sur les SIG

**Cyclone 3DR** est une solution récente de la suite logicielle Cyclone de Leica. Il résulte de la fusion des solutions 3D Reshaper et Leica JetStream et est enrichi de nombreuses fonctionnalités qui permettent de réaliser des tâches comme le traitement de nuage, la classification (manuelle et automatique) et la segmentation ainsi que la création de maillages... De plus, il intègre des outils de détection de formes, d'extraction de lignes caractéristiques ou de lignes de ruptures, des outils très utiles pour notre objectif. Par ailleurs, Cyclone 3DR prend en charge la plupart des formats d'échange de nuage et les nuages de points très volumineux.

## **II. Etude de la phase d'acquisition terrain**

Cette section vise à évaluer la contribution qualitative du SLAM pendant les levés avec le backpack, en intérieur et en extérieur. Nous débutons par une analyse des performances de la

technologie SLAM du LPB en extérieur (II.1), puis en intérieur (II.2), suivie d'une synthèse des résultats de ces expérimentations (II.3).

## II.1 A l'extérieur

La plupart des chantiers actuels de l'entreprise avec le LPB sont des relevés extérieurs pour lesquels, la présence du signal GNSS dans les zones dégagées permet le calcul de la trajectoire par le géoréférencement direct. Or, en présence d'obstacles, la précision diminue. Evaluons dans cette section si le SLAM pourrait remplacer le géoréférencement direct dans de telles situations.

### II.1.1 Présentation du protocole expérimental

Le site sélectionné pour mener nos expériences est le centre-ville de la commune de Castries (34160). Ce site a l'avantage d'être proche du cabinet et il a déjà été levé au scanner statique lors d'une précédente mission, ce qui servira de nuage de référence pour nos comparaisons. Trois types d'expériences vont être réalisés sur ce site pour évaluer la robustesse du SLAM :

**La configuration de la zone de levé** : Cette expérience a pour but d'évaluer l'effet de la présence plus ou moins importante d'amers sur la qualité du levé (dû à l'éloignement ou non des bâtiments). Pour cela, nous avons choisi d'étudier trois zones (nommées zones A, B et C) avec des configurations différentes comme le montre la figure 4. En effet, une rue plus étroite, bien que moins propice au bon fonctionnement du GNSS, a l'avantage de fournir un nuage de points plus riche en amers, ce qui devrait en principe améliorer les performances du SLAM.

Ainsi, **la zone A** est une rue large de type boulevard. Son aspect dégagé fait qu'il y a une bonne réception de signal GNSS, cependant, du fait de sa largeur, les bâtiments scannés (donc les éléments de géométrie) sont éloignés du scanner. **La zone B** représente une ruelle très étroite de type rue de centre-ville historique. La réception du signal GNSS



Figure 4 : Site d'expérimentation et situation des zones [D. Moussa]

est faible du fait du rapprochement des maisons. Cependant, cette proximité des bâtiments peut s'avérer être un avantage pour le SLAM. **La zone C** quant à elle, est une zone intermédiaire entre les deux précédentes. La réception GNSS y est mitigée et les bâtiments et mobiliers urbains semblent suffisamment proches pour une bonne détection des amers par le SLAM.

**La vitesse d'acquisition** : C'est un facteur qui peut influencer fortement la densité du nuage de points obtenu en fin de traitement. Pour l'analyser, nous allons réaliser un levé à trois paliers de vitesse différents. Le premier levé sera fait à une allure lente (**1 m/s**), le deuxième une vitesse de marche moyenne (**1.5 m/s**) et le dernier à une allure de pas plus soutenue (**2 m/s**).

**La nature de la trajectoire** : Pour comprendre l'impact du type de trajectoire observée pendant le levé, nous réaliserons une acquisition avec fermeture de boucle (commencer et terminer le

levé au même endroit). Cela devrait, en théorie, compenser la dérive de la centrale inertielle. Aussi, un levé a-t-il été fait avec une trajectoire en « zigzag ». Les trajectoires en zigzag permettent d'élargir le champ de vision des scanners lidar et d'observer les amers sous divers angles. Elles réduisent également l'impact du masque que pourrait constituer la silhouette de l'opérateur. Nommons **zone D**, le lieu où sera effectuée ce dernier test.

### II.1.2 Phase d'acquisition des données

Avant de procéder à l'acquisition au Leica Pegasus Backpack (LPB), nous avons installé un pivot GNSS dans un espace dégagé à proximité du site. L'installation de ce pivot a un double intérêt dans notre étude. Premièrement, étant donné sa proximité du site, l'utilisation de ce pivot dans un calcul différentiel permettra de déterminer plus précisément les positions du backpack, par rapport à l'utilisation des stations du RGP. Secondement, l'usage de ce pivot a pour but de reproduire les conditions expérimentales de [HACHARD, 2022].

Une acquisition avec le LPB commence et se termine toujours par une phase d'initialisation de l'appareil. Cette phase doit être réalisée dans un espace dégagé avec une réception GNSS optimale. L'initialisation se déroule en deux étapes successives : une initialisation statique suivie d'une initialisation dynamique.

L'initialisation statique consiste à mettre en marche l'appareil et à le laisser poser au sol pendant 2 minutes. Cette étape permet notamment de déterminer une première position de l'appareil et de synchroniser tous les capteurs avec le temps GPS. Elle permet également de vérifier l'horizontalité du système en analysant les observations (roulis et tangage) de l'unité de mesure inertielle.

Ensuite vient la phase dynamique qui a pour but de déterminer le cap (Lacet) du système. Celle-ci consiste à délicatement porter l'appareil au dos puis à marcher à pas soutenu pendant 3 minutes en simulant un rectangle. Le mouvement suivant la ligne droite le long permet de déterminer le gisement du déplacement à partir des enregistrements GNSS successifs et à aligner les mesures de l'IMU suivant cette direction. Les changements de direction quant à eux, sont assimilés à un changement franc de cap (rotation autour de Z). Le cap est ainsi déterminé par différence de gisement.

Pour s'assurer que le système soit bien initialisé, l'opérateur doit observer un ZUPT de 20 secondes qui correspond à une mise à jour de la vitesse à zéro, effectuée périodiquement. Le but de cette manœuvre est de corriger les erreurs accumulées dans les mesures de position, contribuant ainsi à améliorer la précision et la stabilité des systèmes de localisation. Durant cet arrêt, il doit vérifier que la vitesse affichée sur le contrôleur est bien nulle.

Cette phase d'initialisation statique puis dynamique doit être réalisée en début et en fin de mission dans une zone avec une très bonne couverture GNSS car la trajectoire sera calculée dans les deux sens comme l'indique le tableau suivant.

Statique	Dynamique	Acquisition	Dynamique	Statique
2 minutes	3 minutes		3 minutes	2 minutes
Calcul dans le sens aller : « Forward »				
				

Calcul dans le sens retour : « Reverse »		
←		
Zone dégagée, bonne réception GNSS	Déplacements du véhicule pour optimiser le signal GNSS présent dans la zone à mesurer	Zone dégagée, bonne réception GNSS

Tableau 1 : Calcul Forward/Reverse de la trajectoire, [Manuel Inertial Explorer]

Une fois que le système est initialisé, l'acquisition peut réellement commencer. Cependant, il est important de faire attention à éviter les mouvements brusques, les marches arrière ou les demi-tours sur soi-même, car cela pourrait fausser les données de la centrale inertielle. Pendant l'acquisition, si l'on constate une dérive importante de la centrale inertielle (affichée sur la tablette) ou si l'on effectue une longue période d'acquisition dans une zone où la réception GNSS est masquée, il est possible de réaliser une nouvelle phase d'initialisation dynamique de quelques minutes avant de poursuivre l'acquisition.

Dans la suite, l'emploi du terme « *Walk* » fera référence à une portion du nuage de points correspondant à un scénario expérimental donné. Par exemple, *Walk C* désignera le nuage acquis dans la zone C, *Walk V2* le nuage acquis à 2 m/s etc.

### II.1.3 Traitement des données

L'étape du traitement des données s'effectue soit avec le logiciel Leica Pegasus Manager (LPM) ou bien avec Leica Cyclone Pegasus Office (LCPO). Etant donné que le calcul de la trajectoire se fait par double différentielle, il faut fournir au logiciel de traitement les coordonnées précises d'un pivot. Ce pivot peut être une station proche du RGP ou une antenne GNSS placée près du chantier par l'opérateur. Le cas échéant, les coordonnées de cette antenne sont calculées par la méthode de PPK (Post Processing Kinematic) en utilisant les stations RGP voisines sur un logiciel adapté tels que RTKlib ou GrafNet etc...

Ensuite, qu'il s'agisse de LPM ou de LCPO, le traitement des données d'une mission en extérieur avec le backpack peut se décomposer en cinq grandes étapes :

- Étape 1 : Le calcul de la trajectoire de référence (par géoréférencement direct)
- Étape 2 : L'ajustement de la trajectoire par SLAM
- Étape 3 : L'ajustement du nuage à l'aide des GCP
- Étape 4 : Les autres traitements (orientation des images et création d'images panoramiques, génération du nuage de points, classification du nuage de points...)
- Étape 5 : L'export du nuage de points.

Notons toutefois que les étapes 2 et 3 ne sont pas indispensables. Leurs exécutions dépendent du résultat du calcul de la trajectoire de référence par géoréférencement direct qui lui, est obligatoire.

#### II.1.3.1 Avec Leica Pegasus Manager (LPM)

Les travaux de [HACHARD, 2022] ont porté principalement sur les étapes 1, 3, 4 et 5. D'ailleurs, pour rappel, ils avaient pour objectif d'étudier l'influence des GCP sur la trajectoire. Son mémoire apporte donc plus détails sur ces parties. Ces mêmes étapes du traitement peuvent également être retrouvées dans [DESCHARTRETTE, 2017]. Ainsi, au vu de cela et étant donné que l'objectif du présent mémoire est de pouvoir substituer l'ajustement par le SLAM à

l'ajustement par GCP, nous ne nous attarderons que sur l'étape 2, celle de l'ajustement de la trajectoire par le SLAM.

Le terme « *Fused SLAM* » est utilisé par Leica pour décrire le mode d'acquisition des missions en extérieur ou en extérieur-intérieur avec le backpack. Par ailleurs, dans Leica Pegasus Manager, il existe deux modes de calcul SLAM : **Basic SLAM**, qui repose sur la mise en correspondance des points 3D dans le nuage, et **Advanced SLAM**, qui permet de créer des liens entre les passages pour des traitements plus complexes. La méthodologie de traitement Fused SLAM dans Pegasus Manager se déroule comme ce qui suit :

Tout d'abord, il faut « **obligatoirement** » calculer la trajectoire de référence par géoréférencement direct à l'aide du logiciel Inertial Explorer (IE). Il n'est pas possible de calculer la trajectoire par le SLAM sans avoir préalablement calculé une trajectoire de référence par géoréférencement direct. Une fois la trajectoire de référence obtenue, une étape de contrôle qualité est réalisée en analysant les classes de précision fournies par IE. Ces classes de précision attribuent une classification (1, 2 ou 3) à chaque point de la trajectoire en se basant sur différents indicateurs de qualité tels que le nombre de satellites, le PDOP, la fixation des ambiguïtés et l'écart 3D entre le calcul *Forward* et *Reverse*. Cette étape correspond à l'étape 1 mentionnée précédemment.

Une fois cela réalisé, si les résultats ne sont pas satisfaisants, un traitement Basic SLAM peut être appliqué. La qualité de la trajectoire résultante est ensuite contrôlée à l'aide de l'outil « SLAM QC » qui propose plusieurs indicateurs graphiques pour évaluer la qualité de l'acquisition. Ces indicateurs comprennent l'*Attitude Separation* et la *Position Separation*, qui mesurent respectivement l'erreur angulaire et de position entre la trajectoire géoréférencée et la trajectoire Basic SLAM. Le graphique *Status* indique la méthode de calcul utilisée (GPS+IMU, SLAM ou IMU seul) pour chaque portion de la nouvelle trajectoire. Le nombre d'éléments caractéristiques utilisés par l'algorithme SLAM pour la mise en correspondance dans le nuage est représenté par le graphique *Features*. Ce nombre doit être supérieur à 1000 pour garantir la robustesse du calcul SLAM et lorsqu'il est inférieur à 300 à un instant donné, cela signifie que le calcul a échoué. Dans notre calcul, la moyenne des features est autour de 1100 amers et aucun point de la trajectoire n'a été déterminé avec un nombre de features inférieur à 300 comme le montre la figure 5. Enfin, le graphique *Height* fournit l'élévation de l'acquisition à chaque instant, ce qui est utile pour identifier les surfaces planes et horizontales du levé, les isoler et d'y appliquer une contrainte d'élévation. Ces graphiques sont exposés dans l'annexe 2.

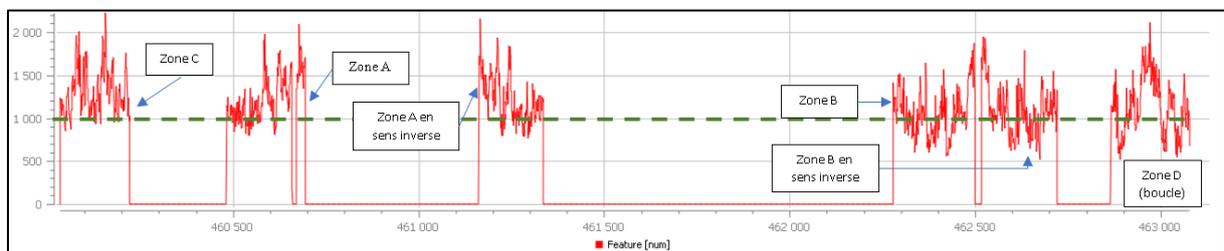


Figure 5 : Nombre d'amers (features) dans le nuage utilisé par le calcul SLAM au cours du temps [D. Moussa]

En analysant ces graphiques, il est possible de supprimer les segments où le SLAM rencontre des difficultés, d'ajouter d'autres segments au calcul ou de contraindre les surfaces planes et horizontales afin d'améliorer la trajectoire. Lors du traitement, nous avons cependant fait le constat que ces outils d'amélioration du Basic SLAM dans LPM sont beaucoup plus adaptés

aux relevés d'intérieur qu'aux relevés d'extérieur. En effet, contrairement au plancher d'un bâtiment, le sol en extérieur est rarement plan et horizontal. Il est donc difficile d'y appliquer ces contraintes d'élévation.

Si après l'ajustement de la trajectoire Basic SLAM, les résultats ne sont toujours pas satisfaisants, le traitement Advanced SLAM peut être effectué, notamment lorsque le levé comporte des zones à multiples passages. Le logiciel crée automatiquement des liens entre les passages, mais il est également possible d'en créer manuellement pour renforcer la robustesse du calcul car ces liens représentent des contraintes supplémentaires.

Une fois ces calculs et contrôles terminés, la trajectoire peut être réimportée dans Pegasus Manager pour poursuivre les prochaines étapes.

### **II.1.3.2 Avec Leica Cyclone Pegasus Office (LCPO)**

Les étapes énumérées en matière de traitement de la donnée dans Pegasus Manager sont, en principe, similaires dans LPM. La grande différence entre ces deux logiciels se trouve en effet au niveau de l'interface graphique. Cependant, le logiciel peut sembler un peu opaque en ce qui concerne le traitement SLAM. Pour effectuer un traitement SLAM dans LCPO, il y a juste une case à cocher pour indiquer à l'appareil d'ajouter l'algorithme SLAM au calcul ou non. Ainsi, dans LCPO, il n'est donc pas possible de réaliser les différents paramétrages SLAM ou de choisir les intervalles où le calcul doit être effectué, comme cela peut être fait dans LPM.

Par ailleurs, dans Pegasus Office, il n'y a pas de distinction entre le Basic SLAM et l'Advanced SLAM. Tout le calcul est effectué en une seule opération. Cependant, Cyclone Pegasus Office propose un outil de création manuelle ou automatique de liens entre les différents passages, ce qui permet d'affiner le résultat du calcul. Cet outil peut effectivement s'apparenter à l'approche « Advanced SLAM » dans Leica Pegasus Manager.

### **II.1.3.3 Le protocole de comparaison dans CloudCompare**

Dans le dessein de garantir la congruence avec les travaux antérieurs sur l'instrument, les ensembles de données de test seront évalués en appliquant le même principe de comparaison exposé par HACHARD dans la seconde partie de son mémoire. À cette fin, nous ferons usage du logiciel open-source CloudCompare.

Initialement, tous les nuages de points que nous souhaitons étudier seront importés dans CloudCompare. Par la suite, les nuages de points seront filtrés en utilisant la fonction « *Noise filter* » de CloudCompare. Cette fonction élimine les points isolés (c'est-à-dire les points qui ne possèdent pas de voisins dans un rayon de 10 cm, dans notre cas), susceptibles de fausser les résultats.

Nous procéderons ensuite à la création de profils le long de la trajectoire, à des intervalles réguliers, généralement tous les 10 mètres comme indiqué sur la figure 6. Afin de garantir la cohérence spatiale des profils, nous utiliserons l'outil « *extract section along polyline* » de CloudCompare. Cet outil permet de tracer une polyligne géoréférencée le long du nuage, puis génère des sections orthogonales à cette polyligne, selon un intervalle régulier préalablement défini par l'utilisateur. En important chaque fois la même droite pour les différents ensembles de données, nous obtiendrons des sections identiques. Il offre un gain de temps appréciable et assure un découpage régulier et cohérent des nuages de points. Les profils ainsi créés, qu'ils soient verticaux ou horizontaux, nous permettront par la suite d'évaluer localement les

différences planimétriques et altimétriques entre les ensembles de données de test et le nuage de référence, en effectuant une comparaison entre les deux groupes.

Pour réaliser cette comparaison, nous ferons usage d'un outil spécifique de CloudCompare, appelé « *Cloud-to-Cloud dist* ». Cet outil est conçu pour comparer deux ensembles de données ou profils, à savoir un profil de référence (Pref) et un profil de test (Ptest). Pour chaque point du profil Ptest, l'outil crée un modèle de surface en utilisant les points les plus proches du profil Pref, puis calcule la distance entre le modèle créé et le point correspondant dans Ptest (figure 6 -c). En ce qui concerne la définition du modèle, CloudCompare propose plusieurs possibilités. Cependant, nous avons choisi d'utiliser le modèle basé sur la méthode des moindres carrés avec les six voisins les plus proches, car nos expériences ont démontré qu'il offre la meilleure estimation des différences dans notre étude. À l'issue du calcul, « *Cloud-to-Cloud dist* » renvoie la moyenne des distances calculées, l'écart-type associé et un champ scalaire. Cette moyenne est retenue comme valeur de différence pour le profil Ptest et est consignée dans un tableau.

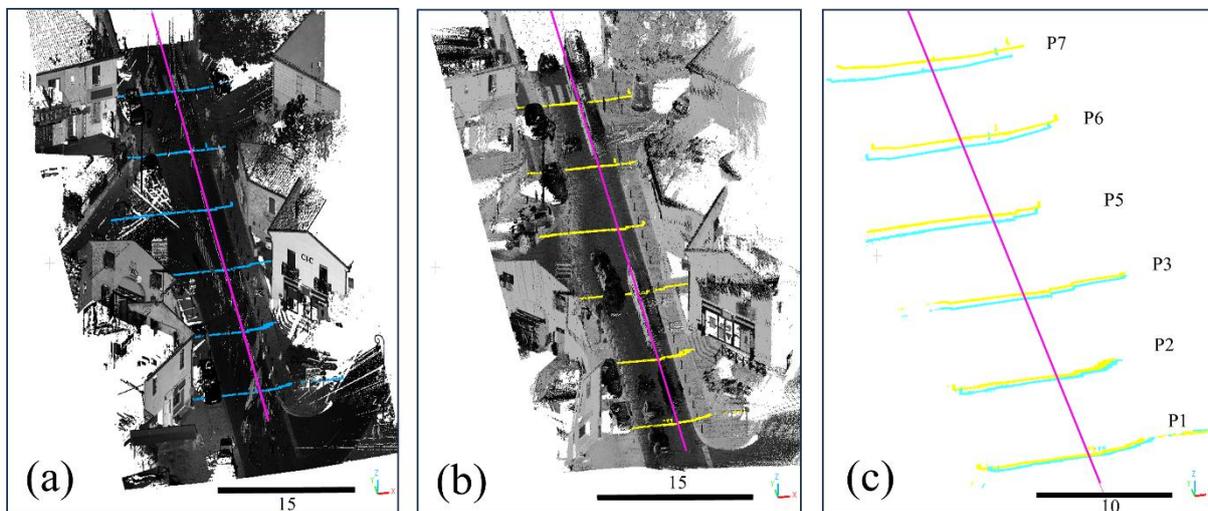


Figure 6 : Création de profils horizontales suivant la polygone magenta, dans le nuage de référence (a) puis dans le nuage test (b). Ces profils sont ensuite superposés (c) puis comparés à l'aide de *Cloud-to-Cloud dist* [D. Moussa]

Cette étape de comparaison est répétitive, car elle nécessite d'être réalisée pour chaque profil horizontal et vertical de chaque trajet, et ce, pour chaque scénario testé. Cela représente près d'un millier d'occurrences. Afin de pallier cette répétition, nous avons développé un script batch sous Windows, qui utilise les commandes de CloudCompare en ligne de commande pour effectuer le calcul des distances entre les ensembles de données en forme de nuages de points. De plus, un programme Python a été créé dans ce but. Ce programme extrait les distances moyennes à partir des messages de la console batch, puis les exporte au format CSV. Les deux programmes sont joints en annexe à ce rapport (voir annexe 3).

#### II.1.4 Résultats et analyses

Les résultats des différents graphes qui suivront représentent l'écart en cm entre le nuage de référence acquis au scanner statique et les nuages de points obtenus à l'aide des différentes méthodes de calcul de la trajectoire. Ces résultats vont être présentés sous formes graphiques. Les données ayant servies à réaliser les graphiques sont consultables dans les annexes 4.

##### II.1.4.1 La configuration de la zone de levé

### II.1.4.1.1 Zone A

Dans cette zone A, on peut constater à l'aide de la figure 7 que les écarts planimétriques et altimétriques sur la trajectoire calculée par géoréférencement direct sont généralement conformes à l'écart spécifié par le constructeur, qui est de 5 cm. Cependant, il existe des endroits où les écarts dépassent cette limite. Par exemple, on observe un pic de 8,5 cm en altimétrie au profil P14 et un autre pic de 9,8 cm en planimétrie au profil P16. Ceux-ci sont dû à une présence ponctuelle de masques GNSS lors de l'acquisition. Ces résultats concernant le géoréférencement direct sont toutefois cohérents avec les travaux antérieurs menés sur l'appareil par [HACHARD, 2022].

De plus, tout au long du Walk, les écarts obtenus par le SLAM sont nettement plus importants que ceux obtenus par géoréférencement direct, tant en altimétrie qu'en planimétrie.

Par ailleurs, les écarts obtenus par la méthode Basic SLAM sont pratiquement identiques à ceux obtenus par la méthode Advanced SLAM. Les différences entre les deux modes de calcul sont de l'ordre du millimètre, voire nulles. À l'échelle des graphiques, elles se confondent.

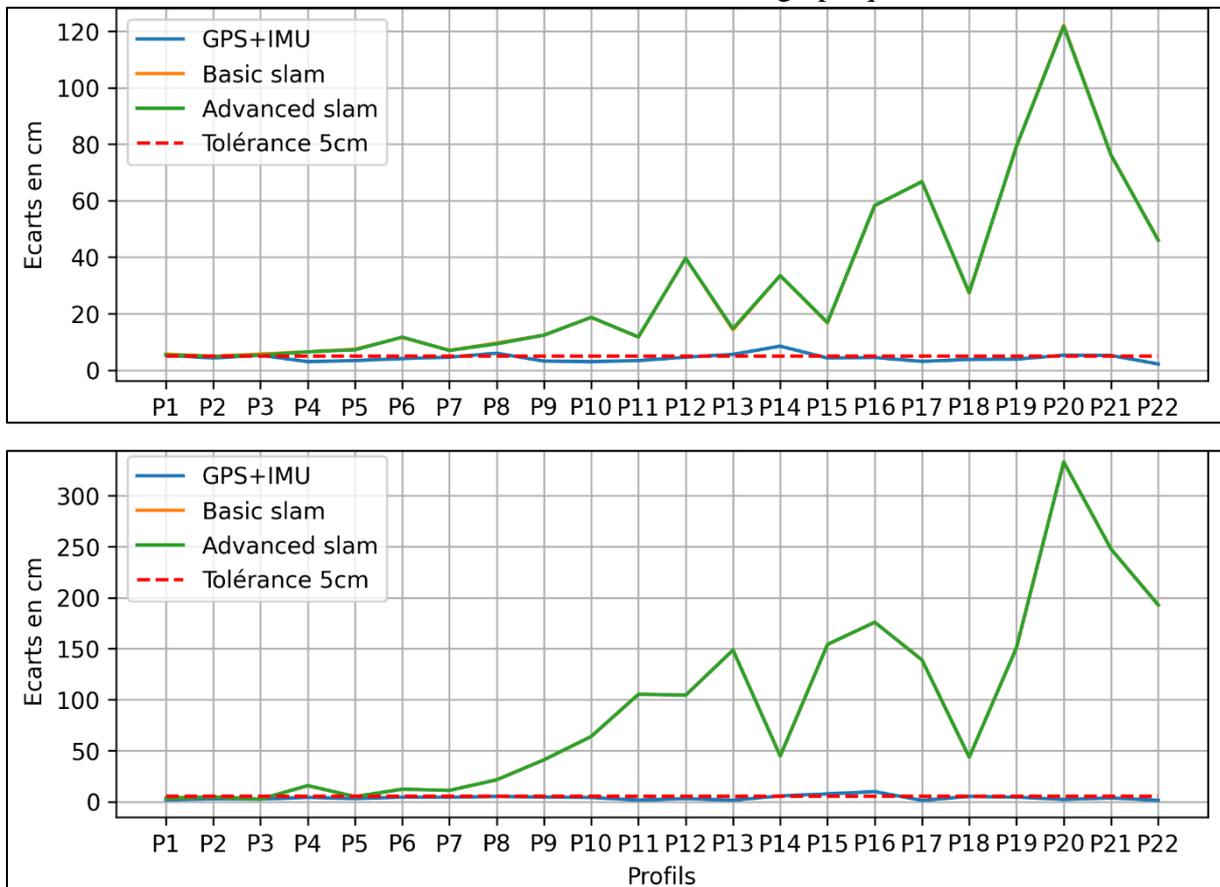


Figure 7 : Ecart altimétriques (en haut) et planimétriques (en bas) en centimètres dans la zone A (Walk A). La numérotation des profils s'est faite dans le sens d'acquisition du Walk [D. Moussa]

L'analyse des écarts planimétriques et altimétriques résultant du calcul par le SLAM révèle que ces écarts ont tendance à augmenter au fil de la durée d'acquisition. Trois paliers d'évolution remarquables peuvent être identifiés. D'abord, les 50 premiers mètres du parcours, entre les profils P1 et P5, présentent des écarts proches de la tolérance de 5 cm. Ensuite, le deuxième palier montre des écarts qui fluctuent entre 10 et 20 cm. Ce palier s'étend sur 100 mètres en altimétrie (de P6 à P15) et est plus court en planimétrie (de P6 à P8). Enfin, le troisième palier

se distingue par des écarts considérablement plus importants, avec des valeurs maximales atteignant 1,22 mètres en altimétrie et 3,33 mètres en planimétrie, notamment au profil P20.

### II.1.4.1.2 Zone B

De manière similaire à la zone précédente, il est à noter que l'imprécision planimétrique et altimétrique sur la trajectoire calculée par géoréférencement est en accord avec les résultats des travaux antérieurs réalisés par [HACHARD, 2022] sur l'appareil dans ce type d'environnement. On observe même un pic au profil P5 (voir figure 8), qui est le résultat de la correction effectuée grâce au calcul reverse/forward de la trajectoire. Par ailleurs, dans cette zone, la trajectoire obtenue par la combinaison GNSS+IMU est meilleure que la trajectoire SLAM pour l'ensemble du parcours. En altimétrie, la trajectoire SLAM suit globalement la tendance de la trajectoire GNSS+IMU, mais présente une imprécision supérieure d'environ 10 cm en moyenne.

De plus, les trajectoires obtenues par les méthodes Basic SLAM et Advanced SLAM sont également pratiquement indiscernables.

Les écarts sur la trajectoire SLAM varient en altimétrie entre 9 et 22 cm sur l'ensemble des profils, avec une moyenne de 15 cm. En planimétrie, on observe une évolution divisée en deux étapes distinctes. Entre les profils P1 et P6, une variation moyenne d'environ 60 cm est observée, avec un pic aberrant de 2,16 m au profil 3. À partir du profil P7, l'imprécision diminue considérablement, atteignant 5,5 cm au profil 8. De manière générale, on constate également ici le phénomène de croissance des écarts en fonction de distance d'acquisition parcourue.

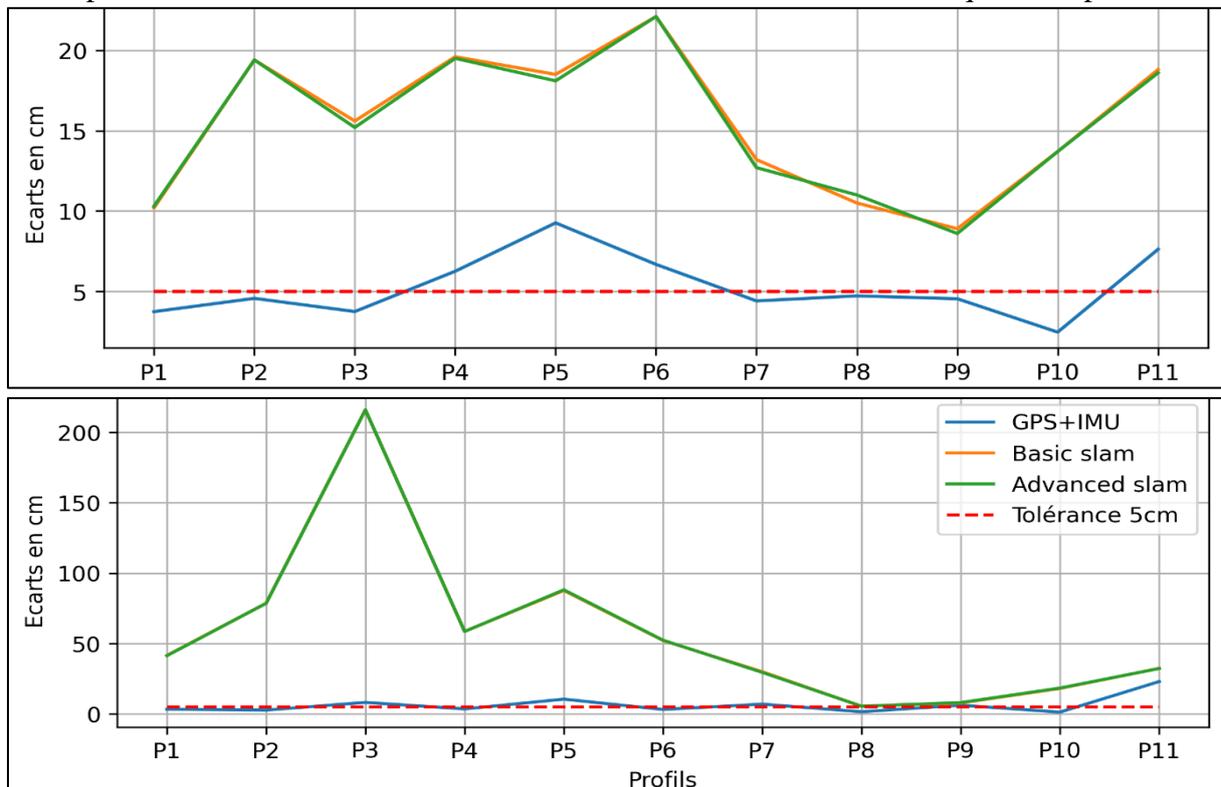


Figure 8 : Ecart altimétriques (en haut) et planimétriques (en bas) en centimètre dans la zone B (Walk B)  
La numérotation des profils s'est faite dans le sens inverse de l'acquisition du Walk [D. Moussa]

### II.1.4.1.3 Zone C

On identifie sur ce graphe à la figure 9, deux stades importants d'évolution des écarts. D'abord, sur les 80 premiers mètres du Walk, la croissance des écarts est douce avec des valeurs

modérées. En planimétrie, les écarts sont majoritairement en dessous de 5 cm. En altimétrie, l'imprécision est un peu plus importante avec une moyenne de 7 cm. Ensuite, la seconde phase débute à partir du profil 8. Durant cette phase, on assiste à une progression beaucoup plus rapide des écarts. En altimétrie, les valeurs de ces écarts restent relativement stables entre 10 et 30 cm. En planimétrie cependant, la fluctuation est plus marquée. On assiste à une variation de 8 à 55 cm avec une valeur discordante de 67 cm au profil 12.

Dans ce Walk aussi, on assiste à augmentation progressive de la valeurs des écarts en fonction du temps, cela en altimétrie et en planimétrie.

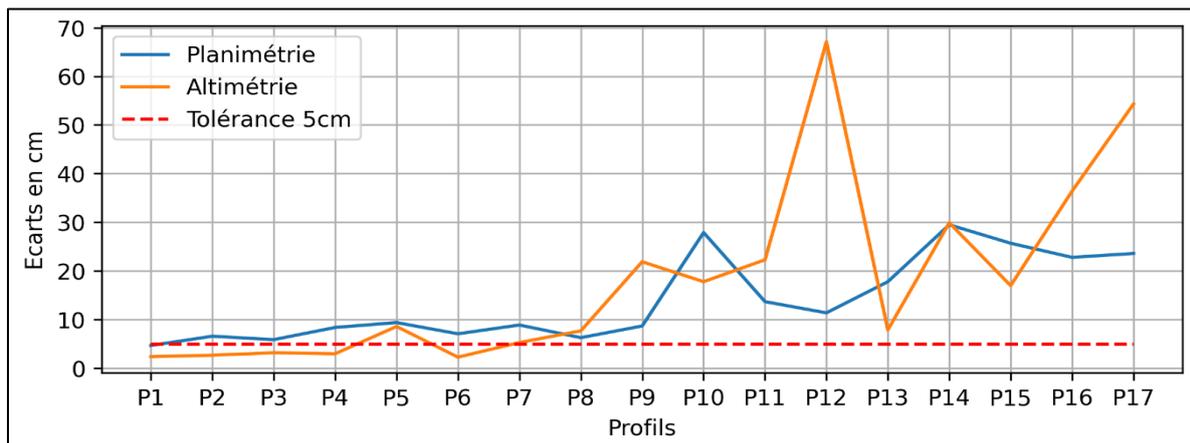


Figure 9: Ecarts altimétriques (à gauche) et planimétriques (à droite) du SLAM dans la zone C (Walk C). La numérotation des profils s'est faite dans le sens d'acquisition du Walk [D. Moussa]

#### II.1.4.1.4 Bilan

Dans l'analyse des nuages de points obtenus dans les différentes zones, un phénomène récurrent se manifeste : une évolution croissante des écarts du calcul SLAM en fonction de la distance parcourue, avec des différences notables par rapport aux résultats obtenus par géoréférencement direct. Cette augmentation est beaucoup plus importante en planimétrie qu'en altimétrie. Elle pourrait s'expliquer par une accumulation de dérive par la centrale inertielle au fil du temps d'acquisition. En ce sens, nos observations concordent avec les résultats de travaux similaires portant sur le SLAM, notamment les travaux réalisés par [GEROSSIER, 2012] ou encore ceux de [SALE, 2022] qui ont porté sur le scanner dynamique Viametris.

On remarque également que la configuration de la zone de levé à un impact sur le résultat du SLAM. Cependant, cet impact semble secondaire comparé à celui de la dérive temporelle de l'IMU, puisque comme le montre la figure 5, l'algorithme SLAM est parvenu à identifier en moyenne 1100 features quel que soit la zone et nous avons pu observer des tendances semblables au niveau des écarts dans les différentes zones.

Par ailleurs, on peut observer que l'écart observé au début du calcul d'un walk par le SLAM est considérablement moins élevé que l'écart présent à la fin du walk précédent. On remarque aussi que l'imprécision sur le SLAM et celle sur le géoréférencement direct sont sensiblement égales. Cela s'explique par le fait que lorsqu'un effectue un calcul SLAM sur un intervalle AB, l'algorithme prend comme point de référence les coordonnées GNSS au point A, d'où les forts écarts observés au début de la zone B.

En somme, on peut déduire que la performance de l’algorithme SLAM du backpack résulte d’une combinaison de la présence plus ou moins importante d’éléments identifiables dans la scène et du temps d’acquisition écroulé.

### II.1.4.2 La vitesse d’acquisition

Dans cette section, nous examinons l’impact de la vitesse d’acquisition à travers les écarts par rapport à la référence obtenus aux vitesses suivantes : 1.2 m/s, 1.5 m/s et 2 m/s. Pour l’analyse, les nuages de points obtenus à ces vitesses sont nommés V1.2, V1.5 et V2 respectivement.

En termes de planimétrie et d’altimétrie, les trois résultats présentent des similitudes générales comme l’indique la figure 10. Dans la plage de P1 à P8, les trois nuages de points ont des écarts relativement faibles, d’environ 5 cm. Cependant, le nuage de points obtenu à 1,2 m/s présente une performance légèrement inférieure sur cet intervalle. En revanche, les nuages V1.5 et V2 montrent une évolution très similaire.

À partir de P9, les écarts augmentent rapidement pour les trois nuages de points. En termes d’altimétrie, les trois affichent une évolution globalement similaire, mais V2 présente l’écart le plus élevé, atteignant 62,7 cm. En planimétrie, les écarts pour V1.2 augmentent brusquement jusqu’à atteindre leur maximum de 149 cm aux profils P13 et P15, puis diminuent. En ce qui concerne V1.5 et V2, l’allure des écarts est identique. Ils augmentent progressivement sur l’ensemble de la trajectoire, atteignant leurs valeurs maximales respectives de 223,5 cm et 224,1 cm au profil P20.

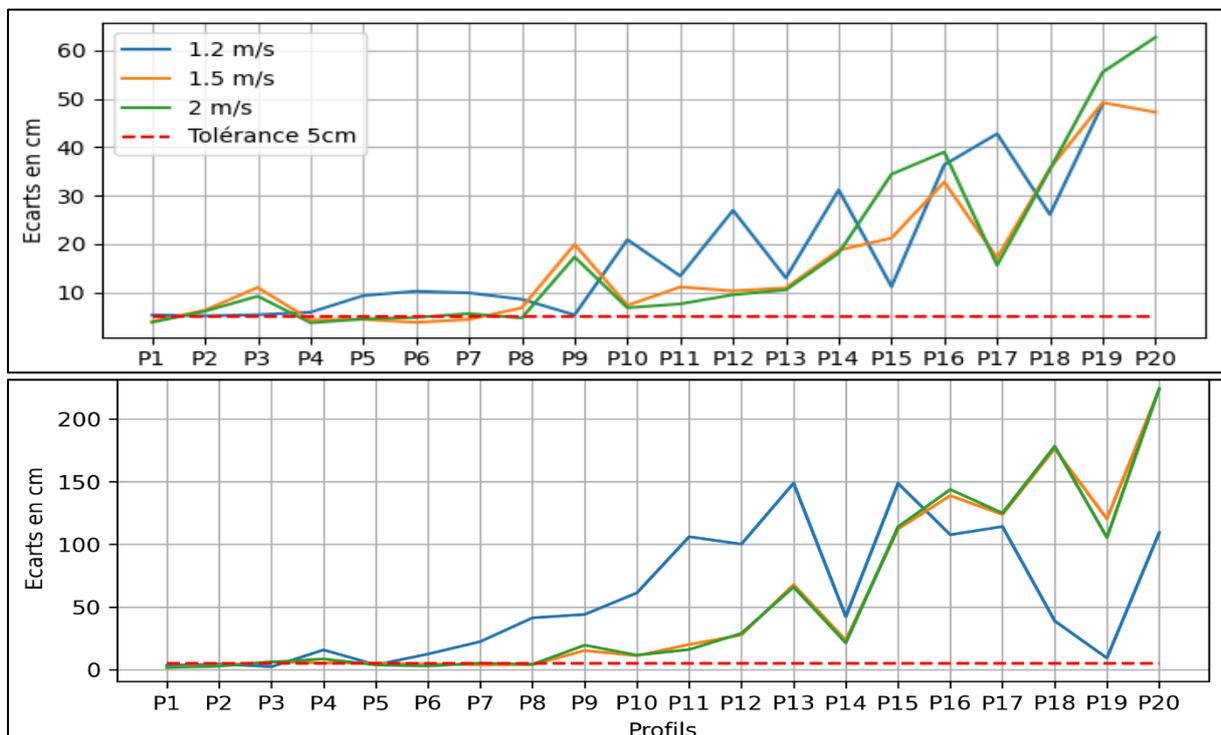


Figure 10 : Ecart altimétriques (à haut) et planimétriques (en bas) du SLAM en fonction de la vitesse d’acquisition. La numérotation des profils s’est faite dans le sens d’acquisition du Walk [D. Moussa]

Le tableau 3 qui répertorie les moyennes des écarts en altimétrie et en planimétrie obtenus dans cette expérimentation.

V1.2	V1.5	V2
------	------	----

Altimétrie (cm)	19.5	16.3	17.7
Planimétrie (cm)	56.8	54.7	54.4

Tableau 2 : Moyennes des écarts altimétriques et planimétriques sur les nuages de points obtenus à 1.2 m/s, 1.5 m/s et 2 m/s

En résumé, les résultats de cette partie mettent en évidence une dérive plus importante générée par le calcul SLAM à faible vitesse. Cette observation peut être attribuée à la présence plus fréquente de bruits et d'artéfacts dans le nuage de données à cette vitesse. En revanche, à des vitesses plus élevées, une meilleure précision est obtenue, mais la densité du nuage diminue, ce qui rend plus difficile la distinction des éléments nécessaires à des tâches telles que la DAO.

### II.1.4.3 La nature de la trajectoire

Les résultats à la figure 11 révèlent que la trajectoire en boucle affiche les écarts les plus faibles. Les amplitudes des écarts sont réduites lors de la fermeture de boucle, suggérant que la dérive du SLAM se compense à ce moment-là. En matière de performance, la trajectoire en zigzag suit la trajectoire en boucle, présentant une allure similaire mais avec des amplitudes d'imprécision légèrement plus importantes.

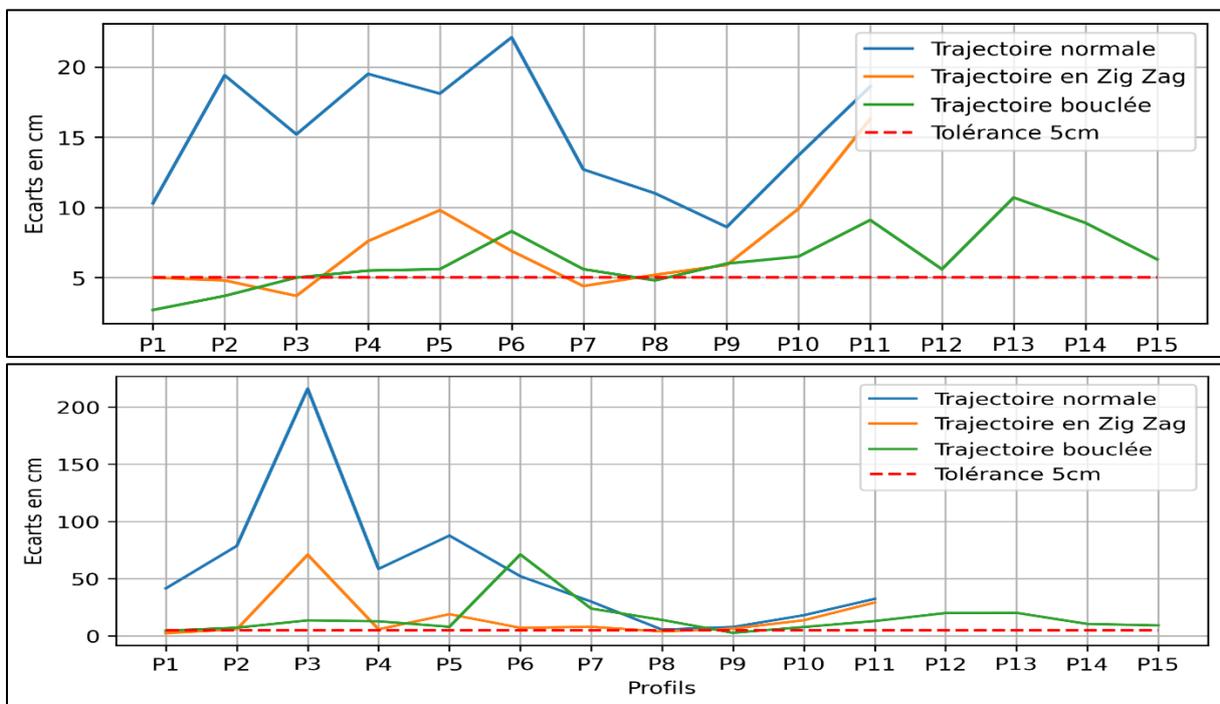
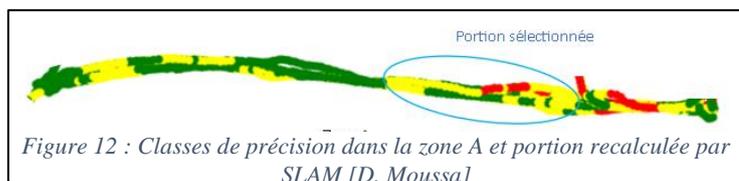


Figure 11 : Ecart altimétriques (en haut) et planimétriques (en bas) du SLAM en fonction de la nature de la trajectoire [D. Moussa]

En résumé, ces deux méthodes d'acquisition permettent une réduction significative des écarts par rapport à une trajectoire à une trajectoire en ligne droite non bouclée.

### II.1.4.4 Expérience complémentaire

Dans le bilan précédent, on a établi que les écarts du SLAM croissent avec la distance parcourue et aussi que le calcul s'effectue à partir du dernier point GNSS précédent l'intervalle. Pour confirmer ces observations, nous avons réalisé un test



complémentaire. Pour ce faire, nous avons identifié une portion de la zone A où le signal GNSS est mitigé que nous avons indépendamment calculer par SLAM. Cette portion est encadrée par des points avec de bons signaux GNSS comme indiqué sur la figure 12.

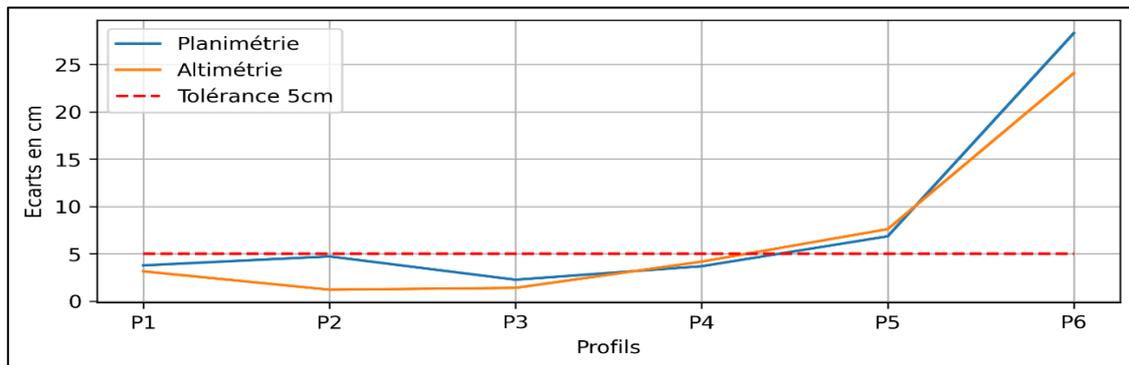


Figure 13 : Ecart planimétriques et altimétriques obtenus sur la portion calculée par SLAM. Les profils sont espacés de 5 m [D. Moussa]

On peut effectivement constater que sur les 20 premiers mètres de cette section, les écarts après un calcul par SLAM sont en dessous de 5 cm. Ensuite, on assiste à une forte croissance de ces écarts jusqu'à atteindre 25 cm dix mètres plus loin (voir figure 13).

### II.1.5 Conclusion

Les expériences antérieures ont révélé que les résultats du SLAM ne dépendent pas uniquement de la configuration de la zone de levé et de sa densité en éléments identifiables. La distance parcourue et donc la durée de l'acquisition ont une très grande importance sur la qualité finale du levé. Lorsque les écarts sont exprimés en fonction de la distance d'acquisition, une augmentation moyenne de la dérive de l'ordre de 0.4 cm/m en altimétrie et de 1.5 cm/m en planimétrie est observée de manière générale.

Lorsqu'on effectue un calcul SLAM sur un intervalle AB, le calcul se fait en un bloc et ne prend pas en compte les éventuels points GNSS de classe 1 qui se trouveraient dans l'intervalle. Ceci fait qu'il n'y a pas de moyen de contrôler la dérive de la centrale inertielle au cours du calcul. Pour pallier cela, on peut sectionner le walk à calculer, de sorte à avoir de plus petits intervalles et en s'assurant d'avoir un point GNSS bien déterminé en amont. Ainsi, on peut avoir des écarts en dessous de 5 cm les premières dizaines de mètres du walk.

Nous avons pu constater par ailleurs, que les résultats des calculs *Basic SLAM* et *Advanced SLAM* sont identiques. De même, les logiciels LCPO et LPM fournissent des résultats assez similaires. La différence entre les deux se ressent plus au niveau de leur prise en main.

Il a également été constaté qu'un levé effectué à une vitesse soutenue produit de meilleurs résultats. Cependant, le nuage de points résultant est moins dense, ce qui peut être un inconvénient lors de l'utilisation en DAO. Il est donc nécessaire de trouver un compromis qui combine précision et densité du nuage de points, d'autant plus qu'une acquisition à une vitesse très soutenue peut être fatigante pour l'opérateur. Une acquisition à une vitesse de 1.5 m/s semble être un compromis approprié.

Enfin, il faut privilégier une acquisition en zigzag dont la trajectoire forme une boucle. Cela permet de considérablement réduire les écarts à la suite d'un calcul SLAM.

## II.2 A l'intérieur

L'objectif de cette partie est d'évaluer les performances du backpack en relevé d'intérieur, là où il n'est pas possible d'utiliser le GNSS.

### II.2.1 Présentation du protocole expérimental et de la zone d'étude

L'expérience consiste à faire l'acquisition de l'intérieur d'un bâtiment avec la méthode « **Pure SLAM** » du backpack. Contrairement au Fused SLAM, le Pure SLAM désigne une acquisition sans GNSS tout au long de la mission. C'est une méthode qui utilise la technologie SLAM pour améliorer le positionnement par la centrale inertielle sans le GNSS.

Le bâtiment sélectionné pour mener cette expérimentation est la cave coopérative de la commune de Montarnaud qu'on peut apercevoir sur la figure 14. Elle est située à une demi-heure en voiture du cabinet. C'est un grand bâtiment d'une emprise au sol d'environ 1 300 m<sup>2</sup> et possédant deux étages et un sous-sol. La cave coopérative a été construite dans les années 30 et est aujourd'hui un bâtiment désaffecté. C'est un bâtiment très intéressant pour l'étude car, comme on peut le voir sur les plans d'intérieur en annexe 5, on y trouve plusieurs sortes de configuration : des longs couloirs étroits et larges ; des petites et des très grandes pièces ; plusieurs niveaux ; des escaliers de part et d'autre des étages etc.



Figure 14 : Zone d'étude : Cave coopérative de Montarnaud [google Map, D. Moussa]

Un autre avantage est que cette cave coopérative a déjà été acquise en 2020 par le cabinet à l'aide du scanner statique Leica RTC. Ce scanner est capable d'acquérir plus d'un million de points à la seconde avec une précision millimétrique (2.7 mm à 50 m selon le constructeur).

On procédera par la suite à une comparaison (durée d'acquisition, de traitement et précision du levé) entre le nuage issu du scanner dynamique LBP et la référence obtenue avec le scanner statique HDS 7000 puis on analysera les écarts planimétriques et altimétriques.

## II.2.2 Phase d'acquisition des données

### Acquisition au Pegasus backpack :

Le relevé d'intérieur avec le Leica Pegasus Backpack en mode Pure SLAM est très contraignant et exige de suivre un protocole strict pour avoir une donnée de qualité.

Le relevé d'intérieur au backpack débute par une phase de préparation de mission consistant à identifier l'itinéraire du levé, la localisation des ZUPT (Zero Velocity Update). Le ZUPT doit être observé chaque 2 minutes au cours du levé et également avant et après chaque passage d'escalier comme indiqué sur la figure 15. L'opérateur doit également identifier la meilleure zone pour s'initialiser et commencer à lever.

Juste avant l'acquisition, les différents capteurs du scanner doivent être synchroniser au temps GNSS, ce qui nécessite de se rendre à l'extérieur le temps de la synchronisation. Ensuite, il faut réaliser une initialisation statique du scanner pendant 2 min, à l'intérieur du bâtiment et sur une surface plane. Cette position de début de levé doit impérativement correspondre à la position de fin de levé pour que l'algorithme SLAM puisse réaliser une fermeture de boucle évoqué dans l'état de l'art. L'initialisation dynamique n'est pas nécessaire dans le cadre d'un levé d'intérieur en Pure SLAM.

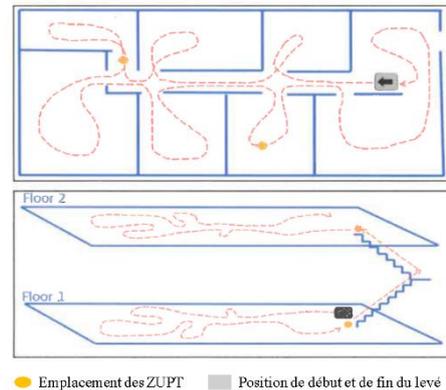


Figure 15 : Position des ZUPTS, manuel LPB

À la suite de la précédente étape, l'acquisition peut débuter. L'opérateur peut ainsi prudemment porter l'appareil en veillant à respecter les règles énoncées pour le relevé d'extérieur. Il doit ensuite appuyer sur le bouton ZUPT pour commencer l'acquisition et l'enregistrement de données lidar et des photos puis se mettre en marche. A partir de cet instant, l'utilisateur ne doit pas marquer d'arrêt si ce n'est pour réaliser un ZUPT. Le cas échéant, il doit appuyer sur le « ZUPT », marquer les 20 secondes d'arrêt, réappuyer sur « ZUPT » et repartir. L'acquisition en Pure SLAM se fait en un seul et unique walk.

Pour terminer l'acquisition, l'opérateur doit retourner à l'endroit où il a débuté et poser prudemment le backpack sur le support plat. Il doit enfin appuyer sur ZUPT et patienter 2 minutes pour l'initialisation de fin d'acquisition.

L'acquisition au scanner dynamique Leica backpack pour cette cave a duré 1h45 et en comptant l'installation et les initialisations cette durée atteint 3h.

## II.2.3 Traitement des données

Le traitement de notre relevé d'intérieur a été effectué avec le logiciel Leica Pegasus manager.

Le traitement des données d'un levé d'intérieur est assez similaire à celui d'un levé d'extérieur. La seule différence notable se situe au niveau de l'étape 1, celle du calcul de la trajectoire de référence, trajectoire qui va par la suite être ajuster par SLAM. En effet, pour une acquisition Pure SLAM, la trajectoire de référence est déterminée dans Inertial Explorer en utilisant la méthode de couplage lâche (« *Loosely Coupled* ») contrairement au Fused SLAM où cette

trajectoire est calculée généralement par couplage serré (« *Tightly-Coupled* ») [DESCHATRETTE, 2017].

Après le calcul de la trajectoire de référence, les étapes suivantes du traitement sont en tout point pareilles que celles mentionnées en II.1.3.1 au sujet du traitement des données en extérieur. Dans la même logique, concernant l'étape de l'ajustement de la trajectoire par SLAM, on y retrouve également le Basic SLAM et l'Advanced SLAM. On peut cependant remarquer que, comme mentionné plus haut, les outils de contrôle et d'amélioration de la trajectoire SLAM sont plus adaptés à ce type de missions. Par exemple, les surfaces planes et horizontales sont facilement identifiables grâce aux différents niveaux du bâtiment (voir figure 16). On peut ainsi les contraindre pour les affiner et avoir de meilleurs résultats.

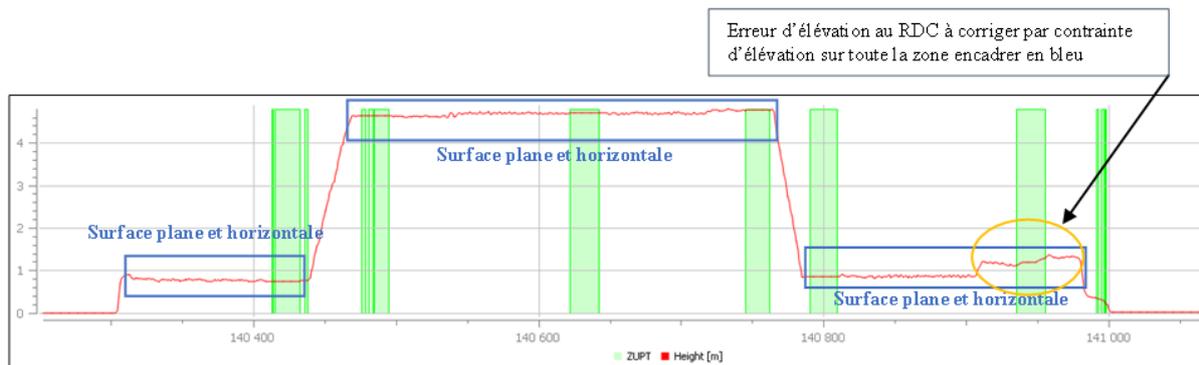


Figure 16 : Elévation du levé au cours du temps (en rouge) et identification des surfaces planes et horizontales (en bleu) [D. Moussa]

Après calcul et ajustement, le nuage de points est exporté de LPM au format E57 dans le but de réaliser les différentes comparaisons avec le nuage de référence.

Pour les comparer, au niveau des étages du bâtiment, nous réaliserons dans chacun des nuages tests et de référence, des coupes horizontales à 1.20 m au-dessus du plancher tel qu'illustré à la figure 17 par exemple. Nous ferons également des coupes verticales au niveau des cages d'escaliers pour apprécier la qualité de celles-ci.

## II.2.4 Résultats et analyses

Après avoir acquis et traité les données issues d'un levé d'intérieur au backpack, analysons maintenant la qualité de ces données.

### II.2.4.1 Analyse de la précision absolue du levé

Lorsqu'on importe le nuage de points à tester et le nuage de points de référence dans un logiciel tel que CloudCompare, on peut remarquer que le nuage provenant du calcul SLAM est translaté en moyenne de 23 m en planimétrie et de 45.6 m en altimétrie par rapport au nuage de référence et également une rotation de 2° autour de la verticale comme le montre la figure 17. Ce décalage bien qu'étant important n'est pas surprenant. En effet, le géoréférencement du nuage du backpack se fait à l'aide de la seule observation GNSS qui est réalisée lors de la phase de synchronisation au temps GNSS. Ce point GNSS permet de situer le nuage à proximité du chantier mais ne permet pas d'assurer un géoréférencement efficace de celui-ci.

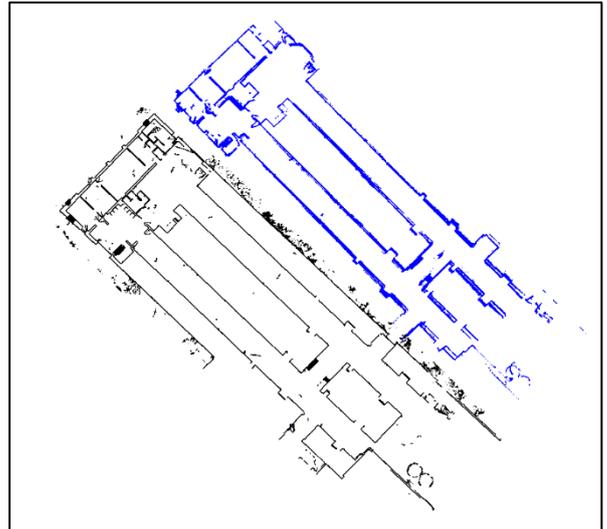


Figure 17 : Coupes horizontales au RDC des nuages de référence (en noir) et du test (en bleu). [D. Moussa]

### II.2.4.2 Analyse de la qualité relative du nuage de points

#### ➤ Analyse du niveau de bruit dans le nuage :

Le bruit dans un nuage de points représente un ensemble de points parasites qui se crée autour de la position vraie du point réellement mesuré. Son intensité varie en fonction de l'appareil de mesure utilisé lors du levé et il influence considérablement la précision finale des rendus créés à partir du nuage de points. Afin d'évaluer l'intensité du bruit généré par le levé Pure SLAM

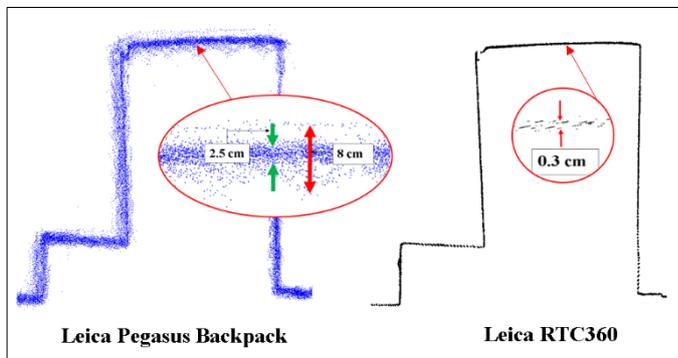


Figure 18 : Analyse du bruit autour d'un pilier du bâtiment. [D. Moussa]

du backpack, nous allons nous intéresser à une coupe horizontale d'un pilier de dimension 70 cm x 50 cm présent dans le bâtiment. L'observation de la figure 18 nous présente une différence caractéristique entre le bruit du RTC360 et celui du LPB. En effet, le bruit maximal observé sur cette portion de nuage provenant du RTC est de 0.3 cm. Concernant le backpack, on observe deux paliers de bruits :

dans un premier temps, une densification de points (cotation verte sur la figure 18) d'une épaisseur de 2.5 cm puis un artéfact de points (cotation rouge) beaucoup plus dispersé autour de l'axe principal. Pour cette seconde catégorie de points, on observe un écart moyen de 8 cm dans la coupe.

De manière générale dans le nuage, le constat concernant le bruit est semblable au constat dressé ci-dessus. Cependant, dans certaines régions du nuage, notamment dans les zones où nous sommes passés plusieurs fois lors de l'acquisition ou encore dans la pièce où le scanner a été initialisé, nous avons constaté que le niveau de bruit atteint en moyenne 5 cm pour « la première densification » et 12 cm pour la seconde catégorie d'artéfacts. De telles intensités de bruit sont problématiques en DAO, la représenter des cloisons par exemple.

### ➤ Analyse de la cage d'escalier :

Les escaliers, en tant qu'élément fonctionnel d'un édifice, jouent un rôle crucial en établissant une connexion entre les niveaux distincts. Cependant, ils posent un défi non négligeable pour les systèmes SLAM ainsi que pour les unités de mesure inertielle en raison de leur structure répétitive et des déplacements verticaux qu'ils entraînent. Cette dynamique peut engendrer des imprécisions dans le processus de SLAM et les mesures de l'IMU. Afin de minimiser ces sources d'erreur, le fabricant préconise d'effectuer un ZUPT avant et après la traversée des escaliers. Dans le contexte de cette étude, une coupe verticale a été réalisée au niveau de la cage d'escaliers à partir des nuages de points de test et de référence. Lorsque ces coupes sont superposées (voir figure 19), plusieurs observations peuvent être formulées malgré le niveau de bruit relativement élevé issu du LPB. Les dimensions entre les divers paliers dans le nuage de test concordent avec celles présentes dans la référence, à la variation du bruit près. De plus, les paliers et les marches sont fidèlement représentés et aisément identifiables.

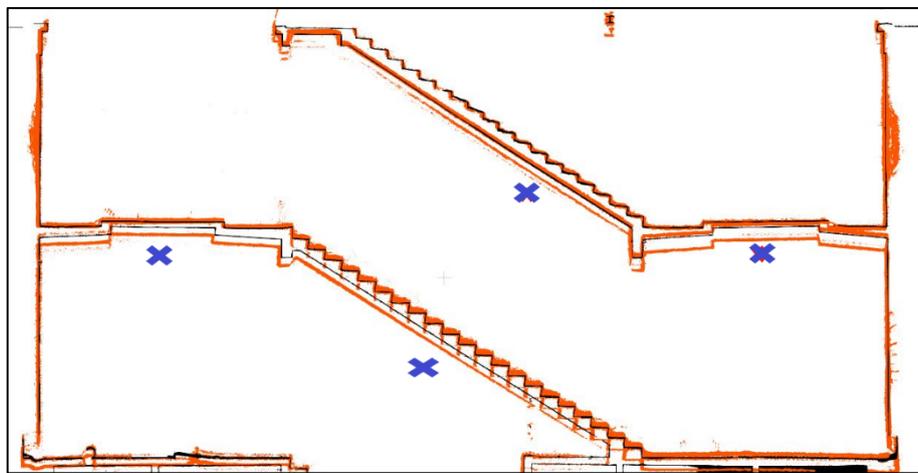


Figure 19 : Superposition des coupes verticales au niveau de la cage d'escaliers dans les nuages test (en orange) et de référence (en noir). Les croix bleues représentent des erreurs de construction du nuage test. [D. Moussa]

Toutefois, une analyse plus poussée a révélé que l'algorithme SLAM a éprouvé des difficultés à reconstituer certaines sections de la cage d'escaliers, conduisant à une duplication de ces parties comme en témoignent les marques en croix bleues dans la figure ci-dessus. Cette redondance de construction concerne principalement les parties inférieures des paliers et des marches. Ce phénomène de duplication a également été observé dans d'autres parties du nuage, ce qui sera exploré dans la section suivante.

### ➤ Analyse d'ensemble du nuage :

En observant dans l'ensemble le nuage de points provenant du Pegasus Backpack et en le superposant à la référence, on s'aperçoit qu'en faisant fi des écarts dû au bruit, les dimensions et les angles des pièces du bâtiment sont bien respectés comme on peut le voir sur la coupe du rez-de-chaussée à la figure 20.

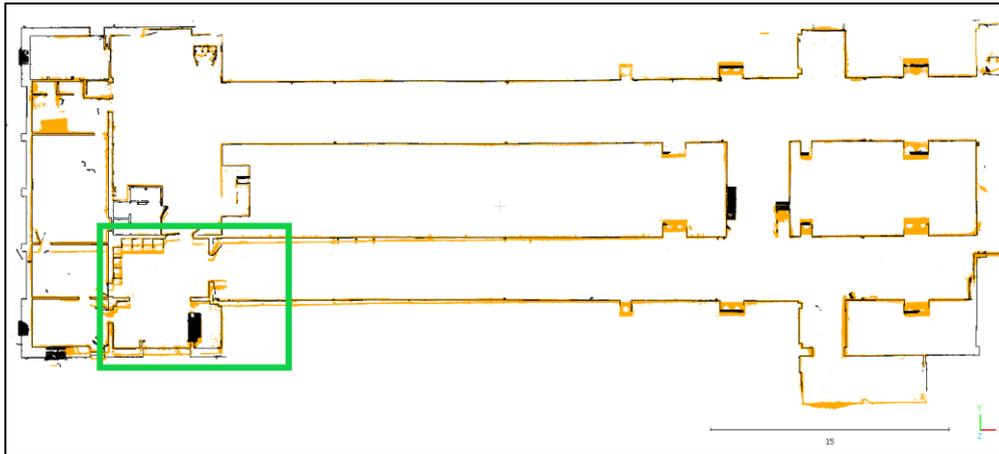


Figure 20 : Superposition des coupes horizontales au niveau du RDC dans les nuages test (en orange) et de référence (en noir). Le carré vert correspond à l'emprise de la figure 24. [D. Moussa]

Cependant, une observation plus minutieuse de cette section révèle la présence d'une anomalie dans la région encadrée en vert, comme illustré dans la figure 20. Nous constatons en effet, une duplication des éléments structurels du bâtiment tels que les murs dans cette zone spécifique (voir figure 21), avec en moyenne un écart de 30 à 40 cm entre l'élément authentique et sa réplique. Ce phénomène de duplication correspond à celui déjà observé dans le contexte des cages d'escaliers. Cette récurrence pose un défi significatif, car en DAO, en l'absence d'un nuage de référence, la distinction entre le mur « réel » et sa réplique peut devenir délicate.

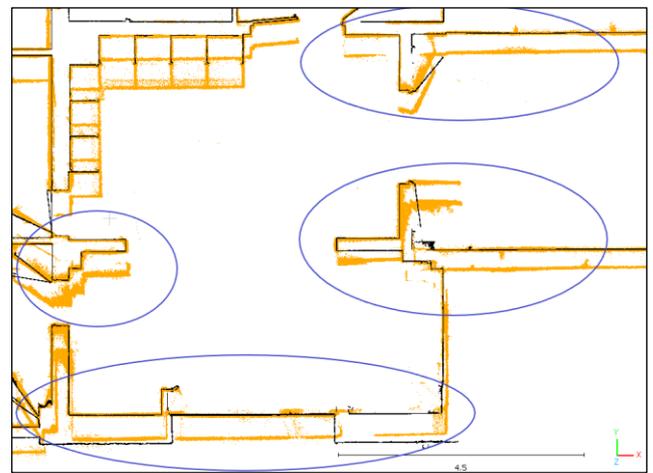


Figure 21 : Duplication de certains éléments du nuage test. [D. Moussa]

Après s'être entretenus avec l'assistance technique de Leica au sujet de ces résultats, nous avons formulé diverses hypothèses afin d'apporter une explication à cette problématique, et elles peuvent être synthétisées de la manière suivante :

- La première hypothèse suggère que l'erreur pourrait résulter d'une manipulation incorrecte ou d'une configuration inadéquate du processus de traitement des données brutes.
- Une deuxième possibilité est que l'erreur découlerait d'une mauvaise exécution de la procédure d'acquisition des données du bâtiment à l'aide du scanner LBP ou d'une acquisition trop longue.
- Enfin, une troisième hypothèse avance que l'erreur pourrait être attribuée à l'algorithme SLAM qui rencontre des difficultés face à certaines configurations et structures présentes dans notre bâtiment d'étude.

Par la suite, des tests ont été entrepris pour examiner attentivement ces hypothèses. En ce qui concerne la première hypothèse, nous avons traité à nouveau la donnée brute en ajustant les paramètres de calcul puis en faisant une transition du logiciel Pegasus Manager vers Pegasus Office. Néanmoins, les résultats obtenus se sont avérés sensiblement similaires. Par ailleurs, afin d'obtenir une perspective extérieure, les données issues du scanner ont été transmises à

l'équipe d'assistance de Leica, dans l'espoir qu'ils puissent les analyser de leur côté. Leur évaluation a toutefois abouti à la même constatation que celle que nous avons établie.

En ce qui concerne la deuxième hypothèse, l'équipe d'assistance de Leica a souligné à nouveau l'importance d'un strict respect de la méthodologie de relevé intérieur mentionnée dans la section II.2.2. Cela implique notamment la nécessité de ralentir lors de la traversée des portes et de conclure l'acquisition au point exact où elle a été initialement lancée. En conséquence, de nouvelles sessions d'acquisition ont été entreprises avec une vigilance accrue envers ces protocoles, incluant un changement d'opérateur pour obtenir des données indépendantes. Nous avons également inclus dans la trajectoire des fermetures de boucle supplémentaire. Nous avons aussi réalisé une acquisition plus courte en se limitant qu'au rez-de-chaussée du bâtiment. Malgré la mise en œuvre de ces mesures préventives, la problématique persiste. En conséquence, notre attention s'est orientée vers la troisième hypothèse.

Au regard des précédentes observations, la troisième hypothèse semble la plus plausible. De plus, en observant attentivement la configuration du nuage, on s'aperçoit que la duplication débute après au passage d'un couloir long d'une quarantaine de mètre. Or, nous savons que ce type de géométrie représente un défi pour les systèmes SLAM. En outre, le bâtiment que nous avons acquis est un bâtiment désaffecté. On retrouve donc à certains endroits des débris au sol pouvant atteindre 20 à 30 cm de hauteur (voir photos en annexe 5). Cela a pour conséquence d'engendrer de fortes erreurs au niveau de la centrale inertielle. Or, « *l'erreur accumulée au cours du déplacement du robot rend la carte incohérente, entraînant en général la duplication d'une partie de l'information qu'elle contient* » comme le souligne [ANGELI, 2008].

Par la suite, une première tentative de résolution a consisté à examiner le graphe des caractéristiques (features), mais cela n'a pas permis d'identifier une diminution significative du nombre d'amers. Pour renforcer la crédibilité de notre analyse, nous avons entrepris une nouvelle acquisition sur un site distinct, en suivant le même protocole que précédemment. Le choix s'est porté sur les locaux du cabinet Bbass, un bâtiment de dimensions approximatives de 170 m<sup>2</sup>, étendu sur deux niveaux. Le caractère professionnel de ce bâtiment, en tant qu'immeuble de bureaux, s'accompagne d'un grand nombre de meubles qui offrent à l'algorithme SLAM des éléments caractéristiques pour mise en correspondance des données.

L'examen du nuage résultant révèle que les constatations formulées concernant le niveau de bruit et la construction générale du bâtiment lors de l'étude précédente demeurent pertinentes ici également. Par ailleurs, il est important de noter que, contrairement au nuage de la cave coopérative, nous n'avons pas observé de phénomène de duplication des éléments (figure 22).

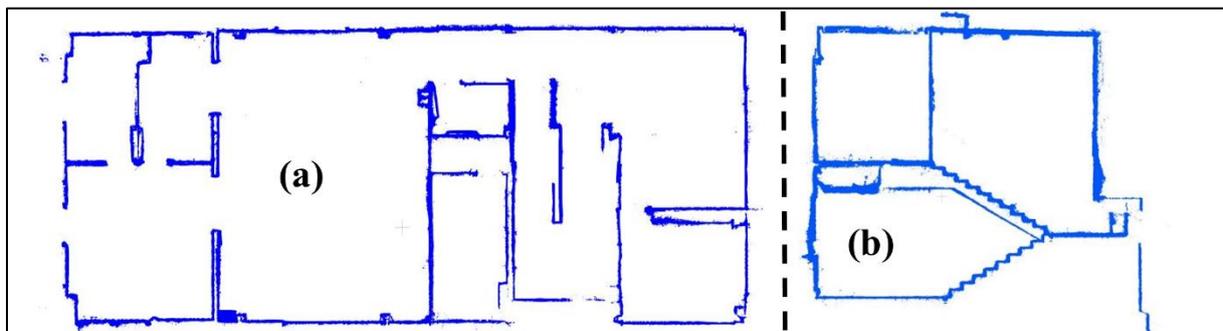


Figure 22 : Coupe horizontale du RDC (a) et coupe verticale de la cage d'escaliers (b) des locaux de Bbass. [D. Moussa]

Cela confirme la troisième hypothèse selon laquelle l'erreur proviendrait de la configuration et de la géométrie du bâtiment.

### **II.2.5 Conclusion**

Cette section démontre la faisabilité de la réalisation de relevés intérieurs au moyen du scanner dynamique Leica Pegasus Backpack, générant ainsi un nuage de points qui représente l'ensemble de la structure du bâtiment. Cependant, il est important de noter que ce type de relevé exige une grande rigueur lors de la collecte des données, bien qu'il ne produise pas un nuage de points géoréférencé, contrairement à ce qui est stipulé dans les spécifications techniques du produit. Par ailleurs, il est crucial de souligner que le niveau de bruit présent dans le nuage de points avoisine les 3 cm, et cette valeur peut s'accroître considérablement, ce qui peut engendrer des difficultés notables lors de l'utilisation en DAO. De plus, notre observation a révélé que certaines configurations et formes architecturales, comme les longs couloirs vides ou les planchers présentant des variations verticales, peuvent avoir un impact négatif sur l'algorithme SLAM, engendrant des erreurs telles que la duplication d'éléments de la carte. Pour contrôler ce genre d'environnement, certains éléments tels que des cartons être intégrés en amont dans la scène. Une autre approche consiste à positionner des points de contrôle géoréférencés (GCP) dans la zone, ce qui permet d'effectuer des ajustements lors du traitement des données. Cependant, il est important de noter que ces approches additionnelles rallongent significativement le temps nécessaire pour acquérir les données.

## **II.3 Bilan**

Cette deuxième partie de notre travail a démontré la faisabilité d'appliquer la méthode SLAM après une acquisition à l'aide du Leica Pegasus Backpack, aussi bien en extérieur qu'en intérieur.

Cependant, en milieu extérieur, la trajectoire SLAM tend à dériver considérablement proportionnellement à la distance parcourue, pouvant entraîner des écarts de plusieurs mètres. Toutefois, en appliquant quelques précautions, telles que segmenter le calcul sur des intervalles plus courts et en s'assurant d'avoir des points GNSS bien déterminés en amont de chaque intervalle, il est possible de limiter cet écart à environ 5 cm sur la période en question, nous dispensant ainsi de la nécessité d'installer des GCP sur cet intervalle spécifique. En outre, nous avons constaté qu'une acquisition à une vitesse de 1,5 m/s est préférable en extérieur.

Le relevé d'intérieur avec le Pegasus Backpack requiert le strict respect d'une méthodologie rigoureuse d'acquisition, ce qui aboutit à un nuage de points non géoréférencé avec un niveau de bruit moyen de 3 cm. Bien que ce niveau de bruit soit similaire à celui d'un relevé extérieur, il présente des défis accrus dans le contexte des relevés d'intérieur, en raison de l'échelle plus réduite et du niveau de détails requis en DAO dans le contexte des levés d'intérieur. Nous avons également constaté que certaines géométries spécifiques des bâtiments ont un impact négatif sur la qualité globale du relevé.

Il est à noter que, pour les relevés en intérieur et en extérieur, les logiciels de traitement LPM et LCPO ont produit des résultats comparables. La différence majeure réside dans la convivialité de l'interface de LCPO, tandis que LPM offre des options de personnalisation des paramètres de calcul plus avancées et des indicateurs graphiques permettant d'évaluer la qualité

du traitement. En absence d'un nuage de référence, cette dernière caractéristique peut se révéler particulièrement utile pour apprécier le traitement.

Enfin, pour les deux types de relevés, les méthodes de calcul Basic SLAM et Advanced SLAM ont donné des résultats identiques. L'assistance technique de Leica a ultérieurement éclairci ce point en nous indiquant que l'outil Advanced SLAM est toujours en cours de développement et que, pour le moment, lorsque le calcul Advanced SLAM est sélectionné, le logiciel effectue en réalité un nouveau calcul Basic SLAM. Par conséquent, l'absence de variation entre les deux résultats s'explique. De même, puisque c'est l'Advanced SLAM qui prend en compte les passages multiples, on comprend donc que ceux-ci n'ont pas encore d'impact sur le résultat final du calcul.

### III. Analyse et optimisation de la chaîne de production de plan

La DAO est la troisième phase dans la suite logique d'un relevé au scanner (statique ou dynamique), après celle de l'acquisition et celle du calcul du nuage. C'est une étape qui peut se montrer très chronophage pour diverses raisons, notamment la quantité de donnée à traiter. On peut parfois y passer autant de temps que les deux autres étapes réunies, voire plus. Pour palier cela, de nombreux travaux ont été réalisés en vue d'optimiser le temps consacré à la DAO. Au nombre de ces travaux, on peut retrouver par exemple des travaux universitaires et des logiciels open-sources qui ont tentés d'automatiser le dessin à l'aide des algorithmes de segmentation et de classification. On remarque cependant que ces travaux sont orientés vers les scanners statiques et fonctionnent difficilement avec les nuages issus d'un scanner dynamique en raison de la taille de ceux-ci et du niveau de bruit qu'ils contiennent.

Pour réaliser la DAO à partir de nuages issus de scanners dynamiques tel que le Leica Pegasus Backpack, plusieurs approches cohabitent dans le monde professionnel.

- On a d'abord la méthode traditionnelle qui consiste à exporter le nuage de points du logiciel de traitement dans un format d'échange. Ce nuage est ensuite importé dans un des nombreux logiciels de DAO habituellement utilisés dans les cabinets de géomètres, tel que *Autocad*. L'opérateur dessine par la suite sur le nuage. Cette méthode est limitante dans le contexte du LPB vue la taille des données que celui-ci produit.
- Une seconde approche est celle des logiciels qui créent une passerelle entre eux et le logiciel de calcul du nuage pour réaliser le dessin. Ainsi, il n'est plus nécessaire d'exporter le nuage de points et on économise le temps associé. C'est cette approche qu'utilise actuellement le cabinet Bbass avec le logiciel *Cloud2Map*. L'utilisation de ce logiciel sera développée dans [la partie III.1](#).
- Une troisième solution est celle de l'automatisation d'une partie ou de toute la production du dessin, comme avec les scanners statiques. Il est assez difficile de trouver des logiciels open-sources fiables pour réaliser cette tâche. Cependant, plusieurs logiciels commerciaux ([voir I.3.2](#)) proposent des outils pour l'automatisation du processus. Parmi ces logiciels, nous nous intéresserons à TerraSolid en [III.2](#) afin d'étudier ses performances.

## III.1 Etude de la chaine actuelle

### III.1.1 Logiciel utilisé et méthodologie de dessin

Dans la mesure où, ni Leica Pegasus Manager ni Leica Cyclone Pegasus Office ne disposent pas de fonctionnalités de DAO, il peut être nécessaire de solliciter une solution externe en vue de l'exploitation du nuage de points obtenu à la suite d'une acquisition au backpack. A l'heure actuel, le cabinet Bbass utilise le logiciel Cloud2Map pour réaliser cette tâche. Cloud2Map est un logiciel interopérable avec les principaux logiciels de traitement d'acquisitions 3D disponibles sur marché, dont LPM.

D'un côté, on a un logiciel de traitement dans lequel il n'est pas possible de faire de la DAO mais, qui permet d'avoir une navigation fluide dans le nuage de points et une grande immersion dans les photos associées. De l'autre, on a un logiciel de DAO qui rassemble toutes les fonctionnalités de Autocad (et pratiquement la même interface) et qui permet donc de produire des plans DWG. L'idée derrière cette interopérabilité est de profiter du plein potentiel de chacun des deux logiciels.

Le mode opératoire à respecter pour dessiner avec Cloud2Map à partir de LPM est le suivant :

- Création d'une connexion entre Cloud2map et Leica Pegasus Manager

Pour connecter les deux logiciels, il faut bien entendu que ces logiciels soient préalablement installés et ouvert sur le poste avec les licences adaptées. On ouvre le projet qu'on souhaite représenter dans Leica Pegasus Backpack puis on y active l'outil *Realtime Data Exchange* (échange de données en temps réel). Parallèlement à cela, dans Cloud2Map, il faut renseigner le système de coordonnées du projet et y charger le fichier de trajectoire du levé en tant que référence externe. Ce fichier permet de définir l'emprise globale du projet dans le logiciel de DAO et d'attribuer à chaque walk des calques différents. A la suite de ces étapes, on peut enfin démarrer la connexion.

- Utilisation des outils de LPM pour naviguer en mode immersif

Par la suite, il est important de paramétrer la vue du projet dans LPM, à savoir le nuage de points et la photo sphérique. Pour un meilleur confort dans le dessin, il peut être intéressant de synchroniser le curseur dans les deux vues ou superposer une portion du nuage à la photo pour mieux visualiser tel indiqué sur la figure 23.

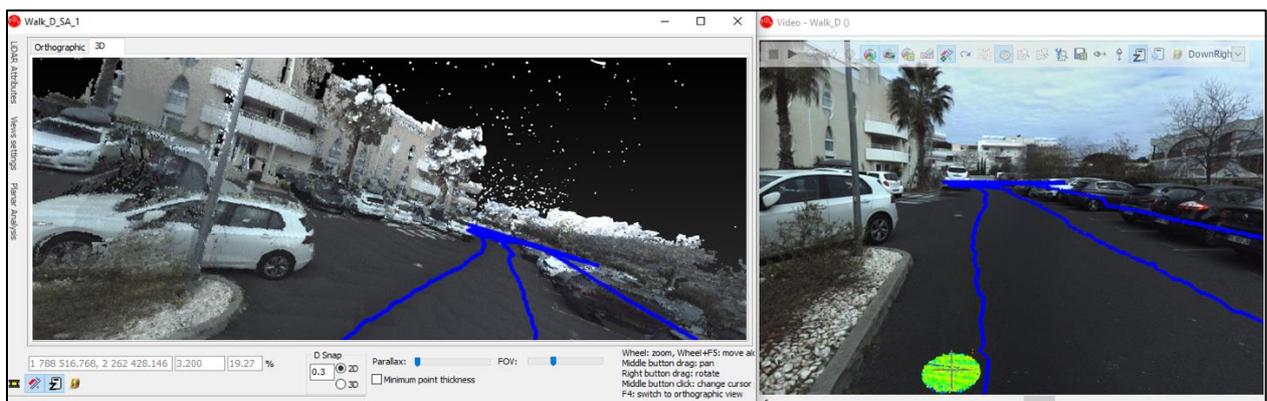


Figure 23 : affichage du projet dans LPM. On aperçoit à gauche, le nuage de points, à droite la photo sphérique, en bleu la trajectoire et le cercle vert correspond à une portion du nuage affichée sur la photo.

- Activation du partage de coordonnées et dessin simultané dans les deux logiciels

On active le partage de coordonnées de LPM à Cloud2Map. Ainsi, quand on souhaite représenter un élément dans Cloud2Map (par exemple un point, une ligne, une polyligne, un cercle, un rectangle, une signalisation verticale ...), on sélectionne l'outil correspondant à cet élément dans Cloud2Map puis on sélectionne le point du nuage où on souhaite l'insérer dans LPM.

Cloud2Map récupère les coordonnées du point en question grâce au partage de coordonnées et représente l'objet souhaité à cette position.

- Finalisation du dessin

Cette phase concerne toutes les étapes de présentation du dessin, de l'habillage, de dessin de carroyage, d'insertion de cartouches etc... Elle se déroule exactement comme dans Autocad, nous ne la développerons donc pas ici.

### **III.1.2 Les limites de la méthode traditionnelle**

La principale limitation de la méthode de dessin actuelle réside dans la quantité importante de temps nécessaire pour réaliser le dessin. En effet, un dessinateur expérimenté consacre généralement quatre fois plus de temps à dessiner un projet qu'il en a fallu pour effectuer l'acquisition. Cette situation découle en grande partie des limitations d'automatisation dans le logiciel Cloud2Map utilisé. Ainsi, le dessinateur doit représenter manuellement tous les éléments du dessin, réduisant ainsi les avantages potentiels de l'utilisation d'un nuage de points généré par le LPB pour la DAO à la seule exhaustivité des données.

## **III.2 Etude de logiciels pouvant être intéressants pour l'étude**

Comme dit dans la [section I.3.2](#), les logiciels de dessin dans un nuage de points sont nombreux. Toutefois, l'attention sera particulièrement portée ici sur les logiciels qui ont un fort potentiel pour l'optimisation du processus de production actuelle du cabinet. On s'intéressera donc aux logiciels possédant des fonctionnalités poussées de segmentation et de classification de nuage de points ainsi que de détection de contours.

### **III.2.1 Etude des solutions choisies**

Après avoir passé en revue des solutions commerciales permettant d'automatiser la production de plans et sur la base des résultats de travaux antérieurs, en occurrence ceux de [REBOUL, 2014], [DESCHATRETTE, 2017] et de [HACHARD, 2022], nous avons sélectionné le logiciel Cyclone 3DR pour effectuer les tests. L'étude portera sur le nuage d'une rue acquise au backpack dans la zone C (voir [II.1.1.2](#)). La rue a été levée au niveau des deux trottoirs pour réduire l'occlusion laser. Le nuage résultant fait environ 300 millions de points.

Pour notre étude, nous nous sommes intéressés particulièrement à la réalisation de plans façade et de plans de corps de rue. Dans cyclone 3DR, nous avons identifié deux approches pour parvenir à notre fin. La première méthode consiste à créer un maillage 3D à partir du nuage de points puis à extraire les contours de ce maillage. La seconde quant à elle, consiste à utiliser

deux scripts particuliers du logiciel. Il s'agit des scripts *Extraction de trottoir* et *extraction de bâtiment*.

Avant de réaliser ces traitements, il faut au préalable disposer d'un nuage de points débruité et classifié.

### III.2.1.1 Débruitage du nuage de points

Pour un fonctionnement optimal des différents algorithmes que nous allons utiliser, il est impératif de disposer d'un nuage de points avec un faible niveau de bruit. Or le nuage de points résultant du backpack a un niveau de bruit moyen de 5 cm et il contient de nombreux points parasites et artéfacts provoqués par les véhicules et personnes en mouvement lors de l'acquisition. Pour réaliser cette opération, nous nous sommes servis de la fonction « *bruit* » de Cyclone 3DR qui élimine le bruit sur la base de la densité local des points. Lors de l'exécution de cette fonction, il faut renseigner une valeur d'intensité de réduction désirer. Le choix de cette valeur est crucial pour le résultat final, car, si elle est trop élevée, cela risque d'entraîner une perte d'informations substantielles (les points du haut de la façades qui sont éloignés du scanner par exemple). A contrario, une intensité très faible n'impactera pas significativement le niveau de bruit. Après plusieurs tests, nous avons constaté que 45% est le meilleur compromis pour notre nuage d'étude. Cette valeur a permis d'éliminer 0.2% du nuage.

### III.2.1.2 Classification du nuage

La classification est une étape préliminaire à l'automatisation de la création. Les travaux menés par [MAOUCHE, 2021] définissent les concepts de classification et de segmentation tout en identifiant certains algorithmes remarquables employés pour leur mise en application.

Au sein de Cyclone 3DR, une fonctionnalité de classification automatique est mise à disposition sous l'option « *Nettoyer/Classification de Nuages/Classification Auto* », laquelle repose sur le Deep Learning. C'est cet outil que nous avons employé. Préalablement à la classification, un filtre de réduction du bruit a été appliqué pour éliminer les points aberrants, ainsi que les personnes et véhicules en mouvement présents dans le nuage. Toutefois, il a été remarqué que, bien que ce filtre parvienne efficacement à éliminer la quasi-totalité des points indésirables, il engendre également une perte d'information substantielle, notamment au niveau des détails des façades, de chaussée et des bordures.

La fonction de classification automatique propose plusieurs modèles de classification selon le type d'acquisition réalisé (aérienne, intérieur, extérieur scanner statique etc.). Etant donné qu'il n'y avait pas de modèle correspondant à notre cas d'étude (levé d'extérieur avec un MMS), nous avons alors sélectionné le modèle des levés d'extérieur au scanner statique et avons modifié les classes par défaut de celui-ci. Ainsi nous avons retenu six classes distinctes qui sont « *Terrain Naturel (chaussée, bordure...)* », « *Bâtiment (façade)* », « *Aménagement Urbain* », « *Végétation* », « *Artéfact* » et « *Non Classifié* ».

Au terme du calcul, on peut constater une classification correcte dans l'ensemble. Cependant, une certaine proportion des mobiliers urbains a été incorrectement classée dans la classe « *artefact* » tandis qu'une partie assez importante des véhicules et personnes en mouvement se retrouve dans les classes « *végétation* » et « *aménagement urbain* ». Une correction manuelle s'est avérée nécessaire.

Dans le but d'évaluer les classifications précédemment réalisées, une classification manuelle du nuage a été entreprise, servant ainsi d'échantillon de référence pour le contrôle. Nous avons par la suite dressé des matrices de confusion (tableau 4). Ainsi, avec Cyclone 3DR, on obtient une précision globale de 85.4 % pour l'ensemble des classes et une précision d'utilisateur de 95% pour la classe sol (terrain naturel).

		Prédiction					Total
		Sol	Bâtiment	Am. Urbain	Végétation	Artefact	
Réalité	Sol	95	1	3	0	1	100
	Bâtiment	1	91	0	7	1	100
	Am. Urbain	3	1	76	6	14	100
	Végétation	0	0	0	100	0	100
	Artefact	1	0	24	19	56	100
	Total	100	93	103	132	72	500

Tableau 3 : Matrice de confusion classification automatique avec Cyclone 3DR

### III.2.1.3 Première approche

#### III.2.1.3.1 Création de maillage 3D

Cette méthode a pour but de créer des maillages 3D des façades et du sol, puis d'extraire les lignes caractéristiques de ces maillages afin de les exporter au formats DWG. Après la phase de classification, nous avons utilisé la fonction « *Exploser par Classe* » afin de générer des sous-nuages distincts pour chaque classe. Nous avons ainsi focalisé notre attention sur le nuage correspondant aux classes façade et sol.

Il existe dans Cyclone 3DR deux fonctions de création de maillage 3D. Cette opération s'est déroulée en suivant la méthode dite « *deux étapes* ». Cette approche implique tout d'abord la création d'un maillage initial composé de triangles réguliers. Dans une seconde phase, ce maillage a été affiné et la taille des triangles est réduite par l'interpolation de nouveaux sommets, en optimisant la forme du maillage à générer.

À la suite de ce processus, la présence de plusieurs pics et trous a été observée aussi bien au niveau du maillage de la façade que celui du sol. Au niveau du sol, ces irrégularités sont principalement localisées aux emplacements où des véhicules étaient stationnés au moment de la collecte de données. La présence des véhicules a engendré des lacunes au sein du nuage de points, provoquant ainsi des espaces vides correspondants au niveau du maillage 3D. En ce qui concerne les façades, ces discontinuités sont principalement dues à une faible densité de points le long des contours des portes et fenêtres ou encore à la présence de matériaux métalliques ou en vers présents au niveau des ouvertures (voir figure 24). Afin de résoudre ces anomalies, nous avons dans un premier temps pensé à augmenter la distance moyenne entre les sommets des triangles du maillage, cette manipulation a engendré soit une perte de détails dans la représentation de la façade, soit une interpolation de sommets qui ne correspond pas fidèlement à la topographie réelle. Nous avons donc finalement opté pour une correction manuelle à l'aide des fonctions de *lisser maillage* et *boucher trous*. Malheureusement, ces efforts se sont avérés insuffisants dans les régions où l'absence de points est plus prononcée. Il est important de noter que ces étapes de correction manuelle introduisent une limite au processus d'automatisation que nous avons entrepris.



Figure 24 : Anomalie dans le maillage de façades de bâtiment [Cyclone 3DR, Google Street View]

### III.2.1.3.2 Détection de contours

Après la création du maillage 3D, nous pouvons désormais extraire les contours dans ces maillages. Pour cela, nous utilisons la fonction « *Contours coplanaire* ». Cette fonction crée un plan à partir du maillage et calcul la normale à ce plan. Ensuite, la fonction détecte les différents contours dans le maillage suivant la direction de cette normale et les projette dans le plan créé.

Après avoir complété les différentes étapes de traitement, plusieurs constatations significatives ont émergé. En ce qui concerne l'analyse des plans de façades, l'algorithme parvient avec succès à extraire de manière approximative les contours des bâtiments ainsi que de leurs ouvertures. Néanmoins, une source d'incohérence est apparue au niveau de certaines ouvertures (voir figure 25).

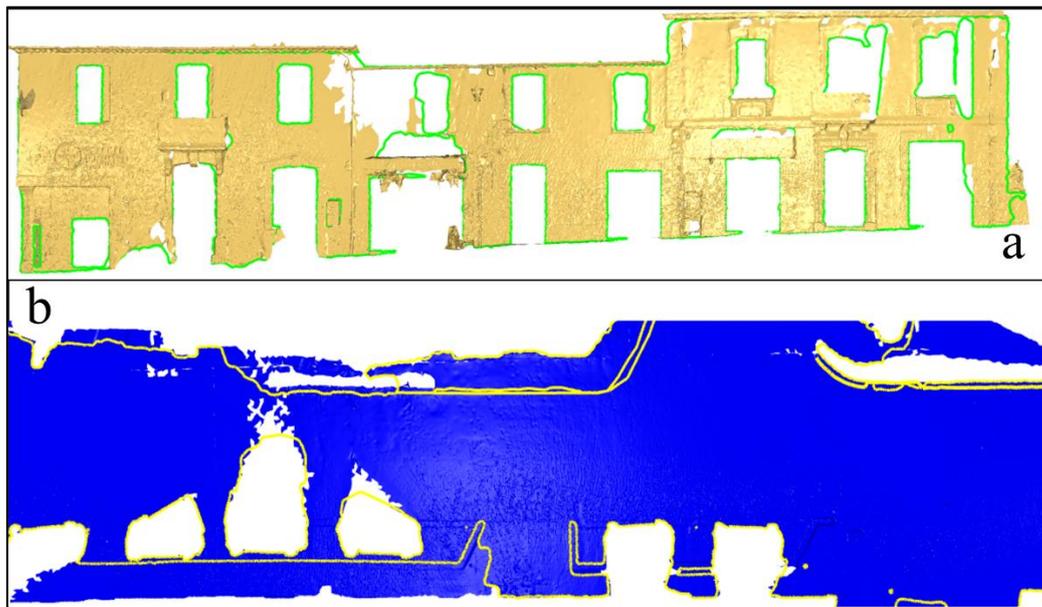


Figure 25 : Vue de face du maillage de la façade avec contours extraits en vert (a) et vue de dessus du maillage du sol avec bordures extraites en jaune (b)

Une problématique analogue s'est manifestée lors de l'examen des plans de rues. Bien que nous ayons réussi à extraire les lignes de bordures dans certaines zones en utilisant la méthode d'extraction de contours, des distorsions ont été détectées dans ces mêmes lignes dans d'autres zones. Ces limites dans la détection sont le plus souvent observées au niveau des irrégularités que nous avons mentionnées dans la précédente partie. De plus les contours générés ne sont pas réellement des lignes. On assiste à un phénomène d'oscillation dû au niveau de bruit du nuage.

#### III.2.1.4 Seconde approche

Cette approche vise à évaluer les outils *extraire bâtiment* et *extraire trottoir* de Cyclone 3DR.

##### III.2.1.4.1 Script « extraction de trottoir »

« *Extraction de trottoir* » est un script disponible dans Cyclone 3DR développé en Javascript et qui permet d'extraire de manière semi-automatique les bordures de trottoirs. Avant d'exécuter le script, il faut dessiner dans le nuage, deux polygones représentant les amorces des parties supérieure et inférieure de bordure. Ces polygones servent également à indiquer la direction de la détection. Les paramètres du script ajustent la largeur, la hauteur et l'angle du trottoir, ainsi qu'un seuil pour l'extraction. Après exécution du script, les résultats montrent que le script parvient à extraire une polygone suivant le tracé du haut de la bordure. Néanmoins, la polygone représentant le bas de la bordure ne reproduit pas fidèlement la réalité et peut parfois inclure des points éloignés de la bordure (voir figure 26). De plus, lors des transitions entre une forme linéaire et une forme courbe de la bordure, le script s'arrête. Ce même arrêt se produit en présence de changements de hauteur dans la bordure.



Figure 26 : haut (en rouge) et bas (en vert) de bordure détectés à par le script « extraction de trottoir »

Cette irrégularité dans la représentation du bas de la bordure peut s'expliquer par le fait que l'acquisition des données a été effectuée depuis le trottoir, ce qui a entraîné une capture insuffisante de points le long de la face externe de la bordure.

##### III.2.1.4.2 Fonctionnalité « extraire bâtiment »

La fonctionnalité « *extraction de bâtiment* » est une commande automatisée visant à générer un maillage de façades de bâtiments en détectant automatiquement les contours coplanaires. À la suite de divers essais, il a été constaté que les contours identifiés par cette commande sont très approximatifs. Cette fonction est particulièrement sensible aux discontinuités dans le maillage. Pour pallier ce problème, nous avons entrepris une approche consistant à retracer manuellement les contours incorrects. Cependant, compte tenu de leur nombre, il est apparu évident que cette méthode perdait de sa pertinence dans le contexte de notre étude.

### III.3 Conclusion

Cette partie a permis de dresser dans un premier temps un état des lieux de la méthodologie actuelle utilisé au cabinet pour dessiner des plans à partir des données du backpack, ce qui a permis de mettre en lumière la dimension extrêmement chronophage de cette tâche. Ensuite, nous nous sommes tournés vers l'étude du logiciel Cyclone 3DR dans le but d'automatiser la

création de plans à partir des nuages de points. Au sein de ce logiciel, nous avons initié le processus en nettoyant les données et en les classant. Nous avons ensuite examiné deux approches différentes. La première impliquait la création d'un maillage 3D à partir du nuage, suivi de l'extraction des contours de ce maillage. La seconde approche a exploré l'utilisation de deux scripts spécifiques du logiciel, à savoir « *Extraction de trottoir* » et « *Extraction de bâtiment* ». Toutefois, nos tentatives ont produit des résultats peu satisfaisants, principalement en raison de trous présents dans le nuage et le maillage. Ces trous sont souvent causés par des masques lors de l'acquisition. Les résultats obtenus ne sont pas adéquats pour des applications topographiques et ne peuvent remplacer la méthode actuelle du cabinet. Cependant, ils pourraient éventuellement trouver une utilité dans des projets de SIG à plus grande échelle, comme celle d'une ville par exemple.

## CONCLUSION

Au cours des dernières années, les scanners dynamiques, tels que le Leica Pegasus Backpack, ont suscité un vif intérêt dans le domaine de la topographie en raison de leurs multiples avantages en environnements extérieurs et intérieurs. Cependant, malgré l'intérêt croissant pour les scanners dynamiques, des défis persistent. Une acquisition rapide et fiable reste cruciale, tout comme la simplicité dans l'exploitation des données scanner.

Notre étude du Leica Pegasus Backpack s'est concentrée sur trois objectifs principaux. Les deux premiers ont exploré la technologie SLAM du backpack, en extérieur puis en intérieur. Le troisième objectif visait à améliorer la chaîne de traitement des données du dispositif.

Ainsi, ce mémoire commence par l'examen des méthodes de calcul de trajectoire du scanner : le géoréférencement direct et le SLAM. Ensuite, nous avons étudié l'usage du SLAM pour le relevé extérieur, prenant en compte diverses configurations. Les résultats ont montré que les performances du calcul SLAM dépendent non seulement de la configuration et de la densité d'amers mais aussi de la distance parcourue et de la durée d'acquisition. En segmentant le calcul en intervalles plus courts et en ayant un « bon » point GNSS en amont de l'intervalle, une précision inférieure à 5 cm peut être maintenue après un calcul SLAM sur cet intervalle. On peut ainsi pallier la pose de GCP lors du levé dans les petites zones de masque GNSS.

De plus, notre étude a démontré la faisabilité du relevé intérieur avec le Leica Pegasus Backpack. Bien que le nuage de points résultant représente la structure et les dimensions du bâtiment, il exige une collecte rigoureuse des données. Cependant, il ne produit pas de nuage de points géoréférencé, comme spécifié par le constructeur. Le bruit dans le nuage de points, d'environ 3 cm, peut poser des problèmes lors de l'exploitation en DAO. Certains agencements architecturaux, tels que les longs couloirs ou les planchers irréguliers, peuvent perturber l'algorithme SLAM, causant des erreurs comme la duplication d'éléments tels que les murs. Pour pallier cela, des éléments tels que des cartons peuvent être incorporés pendant l'acquisition ou des points de contrôle géoréférencés (GCP) peuvent être ajoutés pour ajuster la trajectoire lors du traitement, prolongeant ainsi le temps d'acquisition.

Compte tenu des résultats obtenus avec le SLAM du backpack, ne pourrait-on pas envisager une approche plus bénéfique en intégrant les données des caméras du scanner en complément de celles provenant du capteur lidar dorsal ?

Enfin, pour le troisième objectif, nous avons d'abord analysé la méthodologie de dessin actuelle de cabinet qui s'est avéré chronophage. Par la suite, nous avons établi une liste de solutions potentielles, optant finalement pour Cyclone 3DR afin d'automatiser la production de plans. Nous avons ensuite examiné deux approches distinctes. La première consistait à créer un maillage 3D à partir du nuage de points, suivi de l'extraction de ses contours. La seconde approche explorait l'utilisation de deux scripts spécifiques du logiciel : "Extraction de trottoir" et "Extraction de bâtiment". Cependant, nos efforts ont abouti à des résultats insatisfaisants, principalement en raison des trous dans le nuage et le maillage, souvent causés par des masques pendant l'acquisition. Ces résultats ne conviennent pas aux applications topographiques et ne sauraient remplacer les méthodes actuelles du cabinet. Toutefois, ils pourraient potentiellement trouver une utilité dans des projets SIG à plus grande échelle, comme la cartographie d'une ville, par exemple.

## Bibliographie

- [ABOUZAHIR, 2017] ABOUZAHIR Mohamed, « Algorithmes SLAM : Vers une Implémentation Embarquée », 2017, Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay préparée à l'Université Paris Sud, [lien](#) p25
- [ANGELI, 2008] Adrien ANGELI, « Détection visuelle de fermeture de boucle et applications à la localisation et cartographie simultanées », 2008, thèse de doctorat de l'université Pierre et Marie Curie, [lien](#), p22
- [BAIG, 2012] Qadeer BAIG, « Fusion de données multi capteurs pour la détection et le suivi d'objets mobiles à partir d'un véhicule autonome », 2019, ESGT, [lien](#)
- [CARREAUD, 2020] Antoine CARREAUD, « Amélioration d'une solution d'acquisition existante de données LiDAR dynamiques pour l'utilisation en intérieur : intégration de bibliothèques open source de SLAM et de débruitage », 2020 INSA Strasbourg, [lien](#)
- [DELARIEU, 2019] Arnaud DELARIEU, « Étude d'un MMS backpack Viametris et mise en place d'une procédure de suivi de l'avancement de levés par scanner dynamique dans le cadre de levés à grande échelle », 2019, ESGT, [lien](#)
- [DESCHATRETTE, 2017] Nicolas DESCHATRETTE, « Etude d'un système d'acquisition dynamique mobile et mise en place de procédures permettant de gérer, suivre et valoriser de multiples données », 2017, ESGT
- [ELHASHASH et al., 2022] Mostafa ELHASHASH, Hessah ALBANWAN, Rongjun QIN, « A Review of Mobile Mapping Systems: From Sensors to Applications » 2022, <https://doi.org/10.3390/s22114262>, [lien](#)
- [GEROSSI, 2012] Franck GEROSSI, « Localisation et cartographie simultanées en environnement extérieur à partir de données issues d'un radar panoramique hyperfréquence », 2012, Sciences de l'ingénieur, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II
- [HACHARD, 2022] Robin HACHARD, « Etude de la précision du Backpack de Leica et mise en place d'une chaîne de production fiable, de l'acquisition terrain jusqu'au traitement des données », 2022, INSA
- [MAMBOU KUIPOU, 2016] MAMBOU KUIPOU Ulrich, « Filtrage de Kalman à bruits corrélés pour le positionnement précis », 2016 ESGT, [lien](#)
- [MANSOUR, 2014] Mounir Ait Mansour « Extraction d'éléments géométriques dans un nuage de points LiDAR terrestre : application aux relevés de façades ». Sciences de l'ingénieur [physics]. 2014. (dumas-01164570), [Lien p10](#)
- [MAOUCHE, 2021] Quentin Maouche, « Détection des câbles et pylônes électriques avec un drone équipé d'un capteur Lidar ». 2021, ESGT

- [NARAYANA, 2011] Keerthi NARAYANA « Solutions for the localization of mobile mapping systems in structured environments » 2011, Automatic Control Engineering. École Nationale Supérieure des Mines de Paris. English. NNT : 2011ENMP0020. pastel-00617985, [lien](#) p107
- [REBOUL, 2014] REBOUL Rémi, « Segmentation, classification et modélisation à partir de données issues de capteurs dynamiques », 2014, ESGT, [lien](#)
- [SALE, 2022] Saint Stéphane Ehui SALE, « Evaluation et amélioration de la qualité d'un levé au scanner dynamique bMS3D HD LD5+ » 2022 ESGT
- [TRUN et al., 2005] Thrun, S., Burgard, W., & Fox, D. (2005). « Probabilistic robotics ». MIT press, [lien](#)
- [VALLET, 2011] VALLET Julien. La lasergrammétrie aéroportée, approches théoriques, concepts, méthodes. In : Collection EDYTEM. Cahiers de géographie, numéro 12, 011. Images et modèles 3D en milieux naturels. pp. 29-40 ; doi : <https://doi.org/10.3406/edyte.2011.1175>, [lien](#)
- [Fiche technique Leica] Caractéristiques techniques de Leica Pegasus : Backpack, [lien](#)

## Table des annexes

Annexe 1 : Synthèse de quelques backpack et les indicateurs graphiques d'analyse de la trajectoire dans Inertial Explorer.....	46
Annexe 2 : Indicateurs graphiques d'analyse de la trajectoire dans QC SLAM de Leica Pegasus Manager.....	51
Annexe 3 : Comparaison des nuages dans CloudCompare, script batch et python.....	53
Annexe 4 : Ecarts en cm obtenus suites aux différentes expériences en extérieur.....	56
Annexe 5 : Plans d'intérieur et photos de la cave coopérative de Montarnaud.....	58

## Liste des figures

Figure 1 : Principe du géoréférencement direct de la visée laser. [D. Moussa].....	7
Figure 2 : Schéma conceptuel du fonctionnement du SLAM [DESCHATRETTE, 2017].....	9
Figure 3 : Composition du Leica Pegasus : Backpack [ <a href="https://www.geodatadays.fr">https://www.geodatadays.fr</a> ].....	11
Figure 4 : Site d'expérimentation et situation des zones [D. Moussa].....	14
Figure 5 : Nombre d'amers (features) dans le nuage utilisé par le calcul SLAM au cours du temps [D. Moussa].....	17
Figure 6 : Création de profils horizontales suivant la polyligne magenta, dans le nuage de référence (a) puis dans le nuage test (b). Ces profils sont ensuite superposés (c) puis comparés à l'aide de Cloud-to-Cloud dist [D. Moussa].....	19
Figure 7 : Ecarts altimétriques (en haut) et planimétriques (en bas) en centimètres dans la zone A (Walk A). La numérotation des profils s'est faite dans le sens d'acquisition du Walk [D. Moussa].....	20
Figure 8 : Ecarts altimétriques (en haut) et planimétriques (en bas) en centimètre dans la zone B (Walk B).....	21
Figure 9: Ecarts altimétriques (à gauche) et planimétriques (à droite) du SLAM dans la zone C (Walk C). La numérotation des profils s'est faite dans le sens d'acquisition du Walk [D. Moussa].....	22
Figure 10 : Ecarts altimétriques (à haut) et planimétriques (en bas) du SLAM en fonction de la vitesse d'acquisition. La numérotation des profils s'est faite dans le sens d'acquisition du Walk [D. Moussa].....	23
Figure 11 : Ecarts altimétriques (en haut) et planimétriques (en bas) du SLAM en fonction de la nature de la trajectoire [D. Moussa].....	24
Figure 12 : Classes de précision dans la zone A et portion recalculée par SLAM [D. Moussa].....	24
Figure 13 : Ecarts planimétriques et altimétriques obtenus sur la portion calculée par SLAM. Les profils sont espacés de 5 m [D. Moussa].....	25
Figure 14 : Zone d'étude : Cave coopérative de Montarnaud [google Map, D. Moussa].....	26
Figure 15 : Positon des ZUPTS, manuel LPB.....	27
Figure 16 : Elévation du levé au cours du temps (en rouge) et identification des surfaces planes et horizontales (en bleu) [D. Moussa].....	28
Figure 17 : Coupes horizontales au RDC des nuages de référence (en noir) et du test (en bleu). [D. Moussa].....	29
Figure 18 : Analyse du bruit autour d'un pilier du bâtiment. [D. Moussa].....	29

Figure 19 : Superposition des coupes verticales au niveau de la cage d'escaliers dans les nuages test (en orange) et de référence (en noir). Les croix bleues représentent des erreurs de construction du nuage test. [D. Moussa] .....	30
Figure 20 : Superposition des coupes horizontales au niveau du RDC dans les nuages test (en orange) et de référence (en noir). Le carré vert correspond à l'emprise de la figure 24. [D. Moussa] .....	31
Figure 21 : Duplication de certains éléments du nuage test. [D. Moussa] .....	31
Figure 22 : Coupe horizontale du RDC (a) et coupe verticale de la cage d'escaliers (b) des locaux de Bbass. [D. Moussa].....	32
Figure 23 : affichage du projet dans LPM. On aperçoit à gauche, le nuage de points, à droite la photo sphérique, en bleu la trajectoire et le cercle vert correspond à une portion du nuage affichée sur la photo. ....	35
Figure 24 : Anomalie dans le maillage de façades de bâtiment [Cyclone 3DR, Google Street View] .....	39
Figure 25 : Vue de face du maillage de la façade avec contours extraits en vert (a) et vue de dessus du maillage du sol avec bordures extraites en jaune (b) .....	39
Figure 26 : haut (en rouge) et bas (en vert) de bordure détectés à par le script « extraction de trottoir » .....	40

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Calcul Forward/Reverse de la trajectoire, [Manuel Inertial Explorer].....	16
Tableau 2 : Moyennes des écarts altimétriques et planimétriques sur les nuages de points obtenus à 1.2 m/s, 1.5 m/s et 2 m/s .....	24
Tableau 3 : Matrice de confusion classification automatique avec Cyclone 3DR.....	38

## Annexes

### **Annexe 1 : Synthèse de quelques backpack et les indicateurs graphiques d'analyse de la trajectoire dans Inertial Explorer**

#### **A - Synthèse de quelques backpack**

La figure suivante synthétise les caractéristiques de ces différents sacs à dos, en mentionnant les précisions annoncées par les fabricants.

Systeme	Année de sortie	Intérieur	Extérieur	Caméra	Gamme LiDAR/Max.	Centrale inertielle	GPS	Exactitude*
Leica Pegasus: Sac à dos	2017	✓	✓	360° × 200° FoV	Double Velodyne VLP-16/100 m	✓	✓	Précision relative de 2 à 3 cm Précision absolue de 5 cm
HERON MS Twin	2020	✓	✓	360° × 360° FoV	Double Velodyne Puck/100 m	✓	✗	Précision relative de 3 cm
NavVis VLX	2021	✓	✓	FoV 360°	Double Velodyne Puck LITE/100 m	✓	✗	Précision absolue de 0,6 cm à un niveau de confiance de 68 % 1,5 cm de précision absolue à un niveau de confiance de 95 %
Viametris BMS3D-HD	2019	✓	✓	FLIR Ladybug5+	16 faisceaux LiDAR + 32 faisceaux LiDAR	✓	✓	Précision relative de 2 cm

Figure 1.A : Caractéristiques de quelques MMS type backpack sur le marché [ELHASHASH et al.,2022]

## B - Les indicateurs graphiques d'analyse de la trajectoire dans Inertial Explorer

Lorsqu'on calcule la trajectoire du backpack par géoréférencement direct (GNSS + IMU), il est possible d'avoir un aperçu de la qualité de cette trajectoire le logiciel Inertial Explorer (IE). En effet, le logiciel met à disposition de nombreux indicateurs graphiques (figure 1.1) dont l'analyse nous permet de vérifier le déroulement correct du calcul. Les explications qui vont suivre proviennent du manuel d'utilisation de IE.

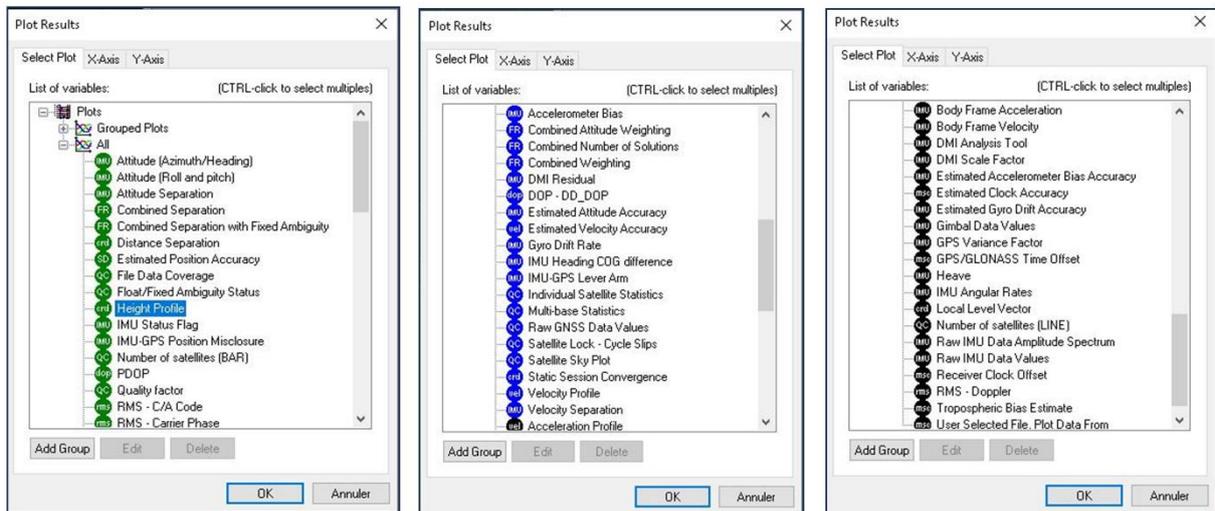


Figure 1.1 : Les différents indicateurs graphiques dans Inertial Explorer

Parmi tous ces indicateurs, six doivent être analysés en priorité pour comprendre les résultats. Ils doivent être analysés ensemble et de manière complémentaire, car l'analyse d'un graphique seul, donne peu d'informations. Ces indicateurs sont le *nombre de satellite observé*, le *statut du calcul GNSS + IMU*, la *séparation angulaire*, la *séparation 3D* et le *PDOD*.

- Le **Nombre de satellite observé** comptabilise les satellites qui ont été observés lors du levé et ceux qui ont été utilisés pendant le calcul. Des critères comme l'observation simultanée par la base et le mobile ou encore l'angle de coupures sont pris en compte pour cela.

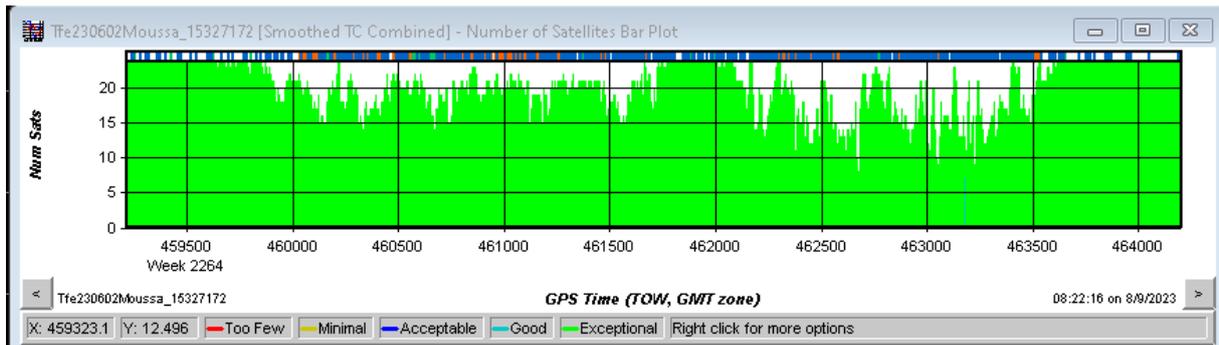


Figure 1.2 : Nombre de satellite au cours du temps durant notre acquisition à Castries

On peut constater grâce à la figure 1.2 que vous avons observé 18 satellites en moyenne pendant notre acquisition.

- Le **Statut du calcul GNSS + IMU** est constitué de deux graphiques qui sont le graphique « *Float/Fixed Ambiguity Status* » présente l'état des fixations d'ambiguïté GNSS et le graphique « *IMU status Flag* » qui indique la source de donnée principale ayant permis d'obtenir les coordonnées (voir figure 1.3).

Un code couleur est associé à ces deux graphiques. Ainsi pour le premier, le vert indiquant que les ambiguïtés GNSS sont fixées, le rouge témoigne d'une solution flottante, le bleu clair et foncé représentent des ambiguïtés fixées pour la solution *forward* et *reverse* respectivement.

Pour le second graphique, le vert correspond à une zone où les ambiguïtés du calcul GNSS ont été déterminées avec succès, le jaune correspond aux ZUPT quand l'appareil est à l'arrêt, le bleu forcé » correspond à une mise à jour obtenue grâce à la poursuite de la phase du signal GNSS lors d'une perte partielle du signal GNSS et enfin le violet représente les GCP apportés par l'opérateur.

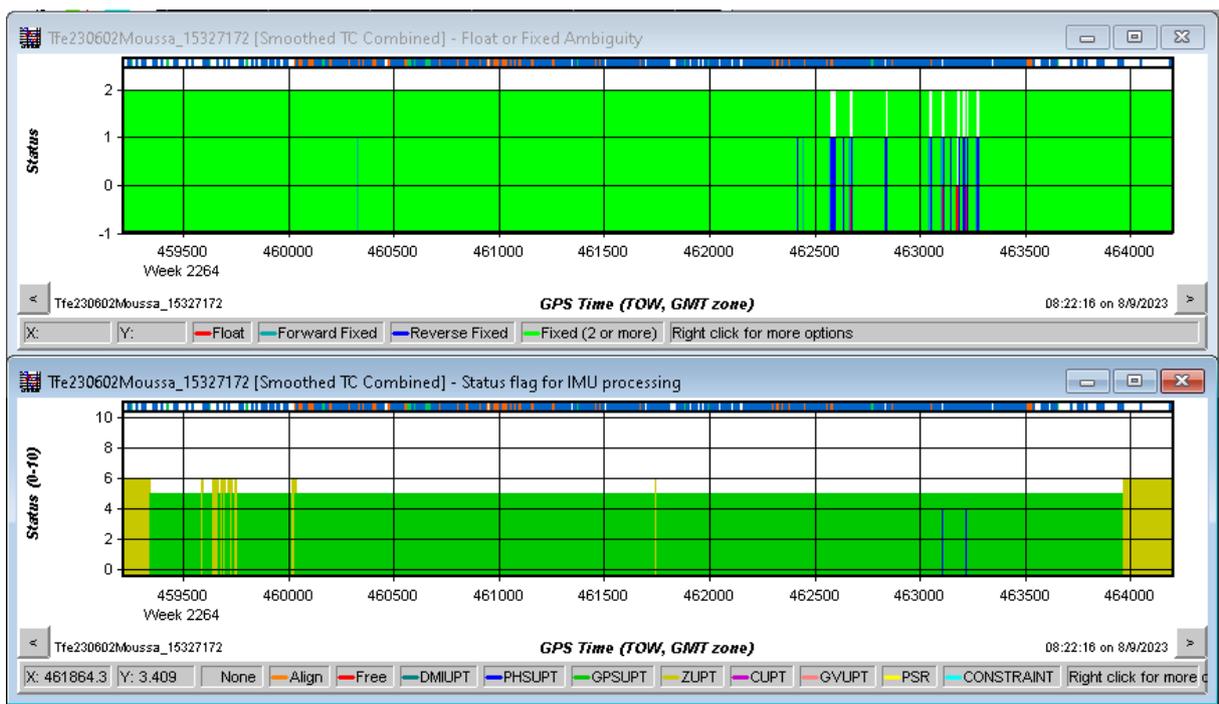


Figure 1.3 : *Float/Fixed Ambiguity Status* (en haut) et *IMU status Flag* (en bas) au cours du temps durant notre acquisition

- La **Séparation 3D** encore appelé *Combined Separation* présente les écarts en entre les coordonnées des solutions « forward » et « reverse » suivant X, Y et Z. Si les deux solutions sont fixées, en terrain dégagé, la séparation doit être de l'ordre de grandeur de la précision GNSS. Si une erreur s'est produite dans le calcul des ambiguïtés d'une ou des deux solutions, la séparation est le seul indicateur qui peut mettre en évidence une incohérence. Dans ce cas le « Float/Fixed Ambiguity Status » sera en vert, (ambiguïtés fixées dans les deux sens) mais il y'aura un écart important entre les coordonnées en « forward » et en « reverse ». Ce qui signifie qu'une des deux solutions ou bien les deux solutions du calcul GNSS sont fausses à cet instant.

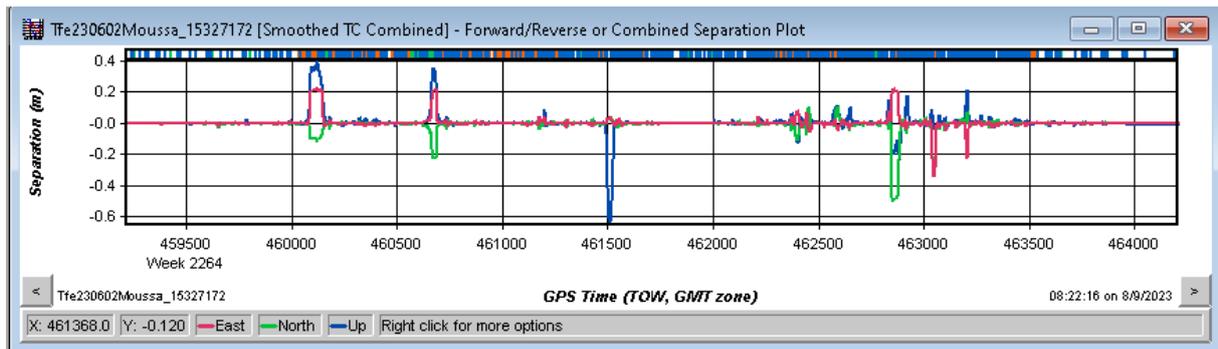


Figure 1.4 : Séparation 3D de l'acquisition réalisée à Castries

On peut apercevoir sur la figure 1.4 des pics ponctuels dans les écarts entre les calculs forward et reverse de notre levé. Ensuite, dans le troisième tier du levé, on observe une zone de forts écarts, cette zone correspond à notre zone B où le signal GNSS est mauvais.

- La **Séparation Angulaire** encore appelé *Attitudes Separation* représente les écarts en entre les orientations du système calculées pour les solutions « forward » et « reverse » suivant le roulis, le tangage et Heading.

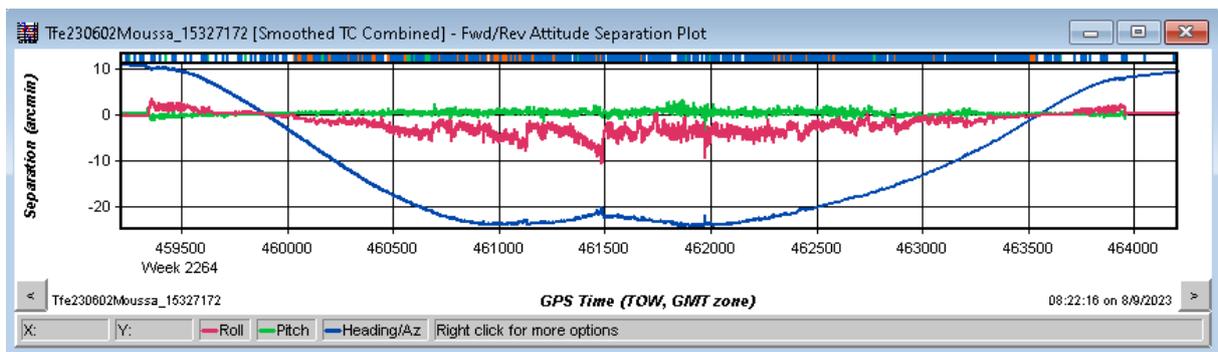


Figure 1.5 : Séparation Angulaire de l'acquisition réalisée à Castries

On peut remarquer que lors des initialisations dynamiques en fin et début de levé, les solutions forward et reverse du cap convergent.

- Le **PDOP** (Position (3D) dilution of precision) est un chiffre qui qualifie la répartition des satellites observés lors de l'acquisition. Plus ce chiffre est bas, mieux la géométrie des satellites est favorable à une bonne précision.

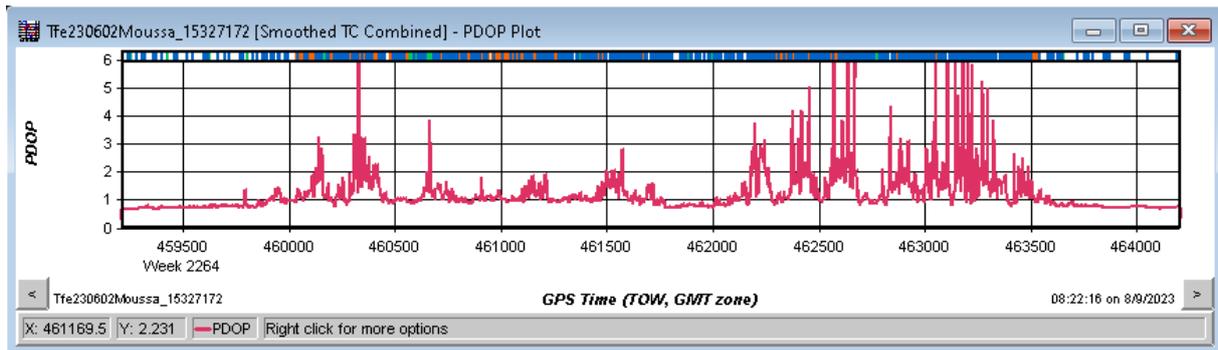


Figure 1.5 : Evolution du PDOP au cours de l'acquisition réalisée à Castries

Enfin, nous pouvons citer les **classes de précision** qui permettent une synthèse visuelle de la qualité de la trajectoire. Elles correspondent à une classification des différentes portions de la trajectoire scannée sur la base de l'analyse des différents indicateurs mentionnés ci-dessus. Ainsi, on distingue trois classes précision absolue : haute précision (classe 1 en vert), moyenne précision (classe 2 en jaune) et basse précision (classe 3 en rouge). Le tableau 1.1 rappelle les différents critères de classification des portions de la trajectoire et la figure 1.6 montre un exemple d'application de ces classes.

Catégorie	<b>Haute</b>	<b>Moyenne</b>	<b>Basse</b>
	Doit remplir simultanément toutes ces conditions	Si toutes les conditions de class 1 ne sont pas réunies sans dépasser la class 3	Dès qu'une de ces conditions est remplie
Class	1	2	3
Précision Absolue	Inférieure à 2cm	Entre 2 et 5 cm	Supérieure à 5cm
Nombre de GPS	Nb GPS $\geq 6$	Nb GPS $\leq 5$	Nb GPS $\leq 4$
Fixation Ambiguïté	Forward + Reverse	Forward ou Reverse	Solution flottante ou nulle
Séparation 3D	$\leq 0.02m$	$< 0.05m$	$\geq 0.05m$
PDOP	$\leq 2$	$< 3$	$\geq 3$
Ecart type	$\leq 0.015m$	$< 0.03m$	$> 0.03m$
Facteur Q (IE)	1	1 ou 2	2

Tableau 1.1 : Critère des différentes classes de précision de Inertial Explorer

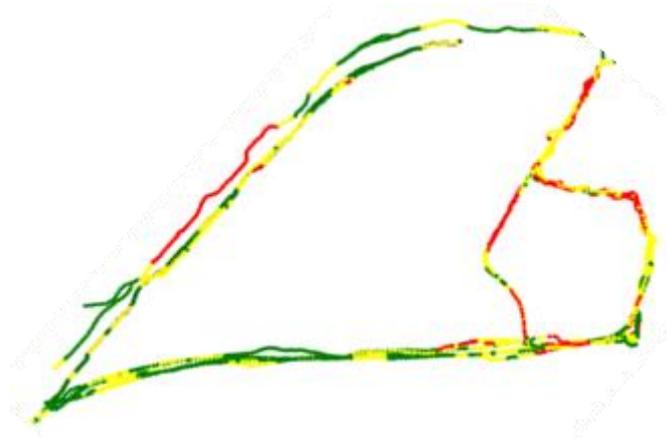


Figure 1.6 : Classes de précision appliquées à la trajectoire de notre acquisition en extérieur à Castries

## Annexe 2 : Indicateurs graphiques d'analyse de la trajectoire dans QC SLAM de Leica Pegasus Manager

Après avoir effectué un calcul SLAM dans Leica Pegasus Manager, il y a plusieurs indicateurs graphiques dans QC Tools qui permettent de jauger la qualité du levé. Ils sont au nombre de sept. Ces graphiques doivent également être analysés ensemble et de manière complémentaire.

Les définitions suivantes proviennent du manuel d'utilisation de Leica Pegasus Manager et les graphiques qui suivront les résultats du calcul SLAM de notre relevé d'intérieur à Montarnaud.

- Nous avons *Position Separation* et *Position Standard Deviation* qui indiquent respectivement les écarts en mètre entre la trajectoire de référence et la trajectoire SLAM et l'écart-types associés à ces écarts.

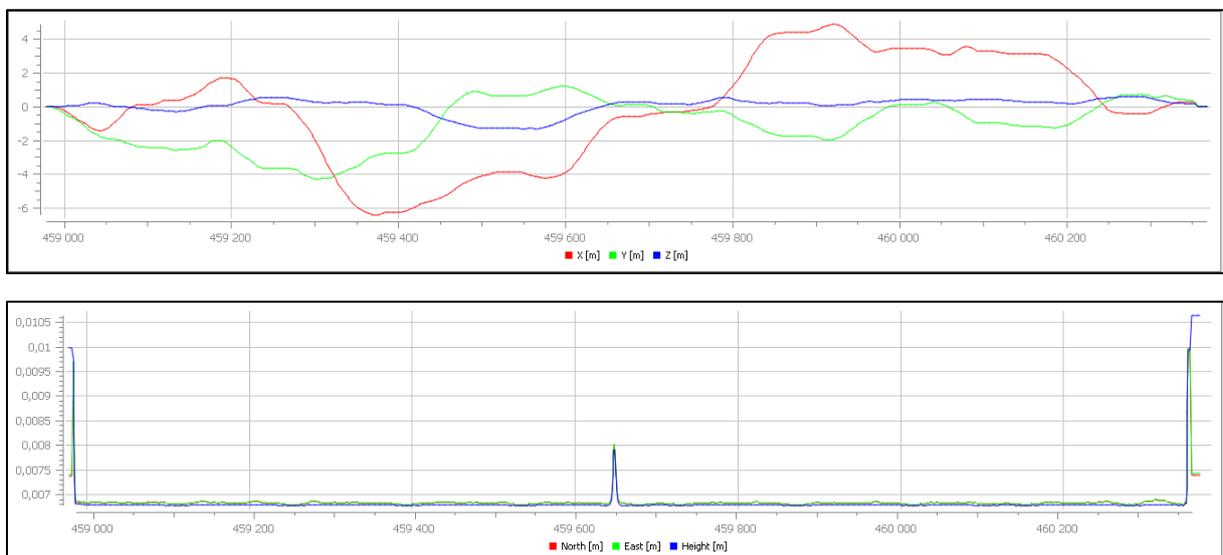


Figure 2.1 : Position Separation et Position Standard Deviation de calcul de la cave coopérative

- Ensuite, nous avons *Attitude Separation* et *Attitude Standard Deviation* qui représentent les erreurs d'orientation entre la trajectoire de référence et la trajectoire SLAM suivant le roulis, le tangage et Heading et l'écart-types associés à ces écarts.

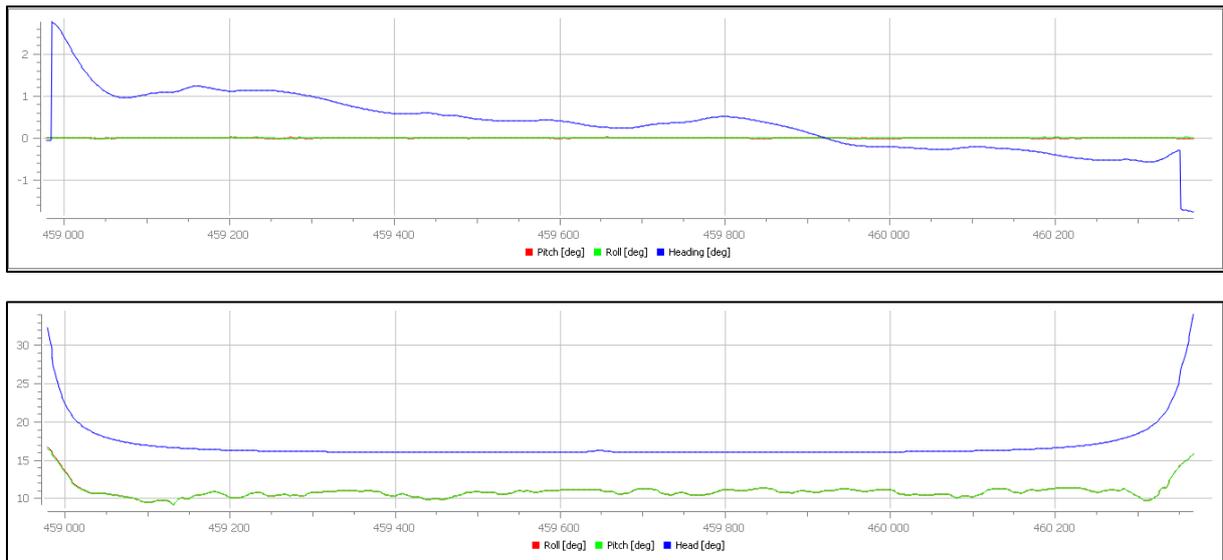


Figure 2.2 : Attitude Separation et Attitude Standard Deviation de calcul de la cave coopérative

- En outre, le graphique *Height* représente les différentes du scanner durant l'acquisition. On observe par exemple une ligne lorsque l'acquisition se fait sur une surface plane tel que le plancher d'un étage. Ce graphique présente également les différents ZUPT observés pendant le levé.

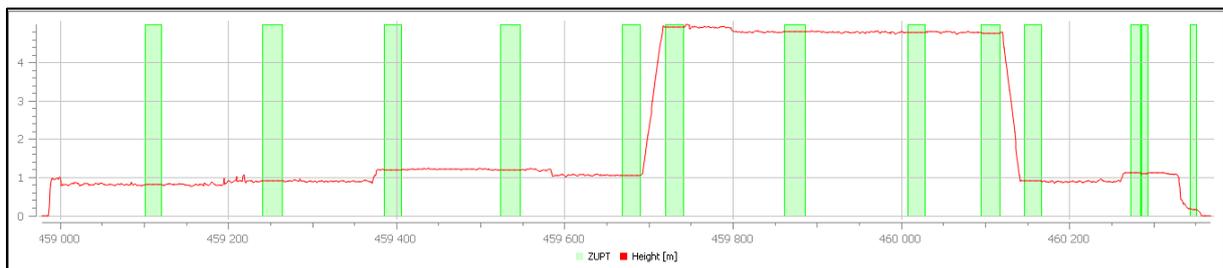


Figure 2.3 : Elévation suite au calcul SLAM de la cave coopérative de Montarnaud

- En outre, nous avons l'indicateur *feature* met en évidence la quantité d'amers en commun entre deux pauses consécutives du SLAM. Une pause correspond à environ une seconde de données. Lorsque cette valeur est supérieure à 1000, cela signifie que le calcul s'est bien déroulé. Une zone à faibles caractéristiques (feature entre 300 et 1000) ne correspond pas nécessairement à une mauvaise zone, mais il peut quand même s'agir d'une situation dangereuse qu'il vaut mieux vérifier. En dessous de 300, il est préférable d'exclure cette zone du calcul SLAM.

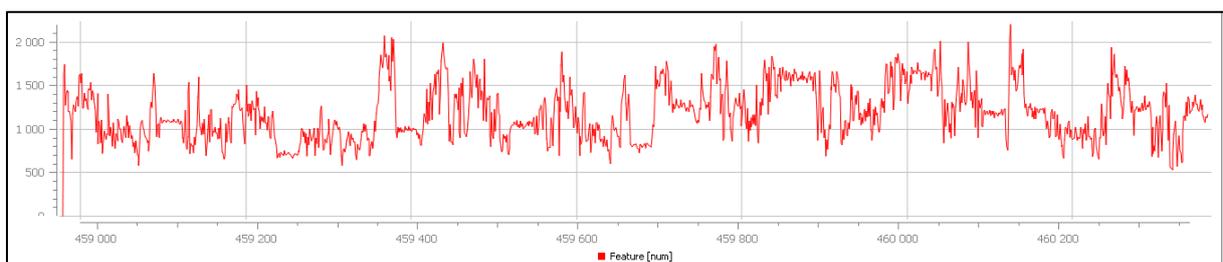


Figure 2.4 : Nombre d'amers utilisé dans le calcul SLAM de la cave coopérative de Montarnaud

- Enfin, nous avons le graphique *statut* qui indique la source de donnée principale ayant permis d'obtenir les coordonnées. Le vert indique que la trajectoire a été déterminée par GNSS + IMU, le rouge signifie qu'elle a été calculée qu'on la centrale inertielle et le bleu indique un calcul SLAM.

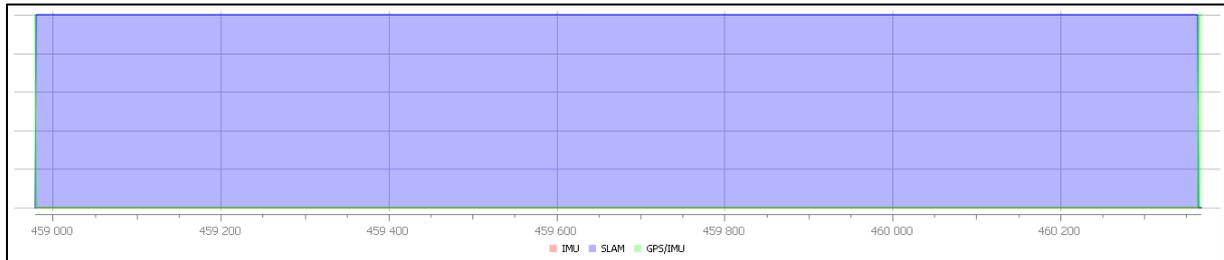


Figure 2.5 : Graphique Statut du calcul SLAM de la cave coopérative de Montarnaud

### Annexe 3 : Comparaison des nuages dans CloudCompare, script batch et python

1. Pour comparer deux nuages de points (test et référence) dans CloudCompare (CC), il faut d'abord importer ces deux jeux de données dans le logiciel. Lors de l'import, CC propose d'effectuer une translation locale du nuage en retranchant une certaines valeurs des coordonnées xyz des points (voir figure 3.1). Cela a pour but d'alléger la taille du nuage dans la mémoire vive de l'ordinateur et de rendre le traitement plus rapide. Il faut toutefois veiller à appliquer les mêmes valeurs de translation à tous les nuages importés dans le projet, au risque d'avoir un écart relatif entre eux.

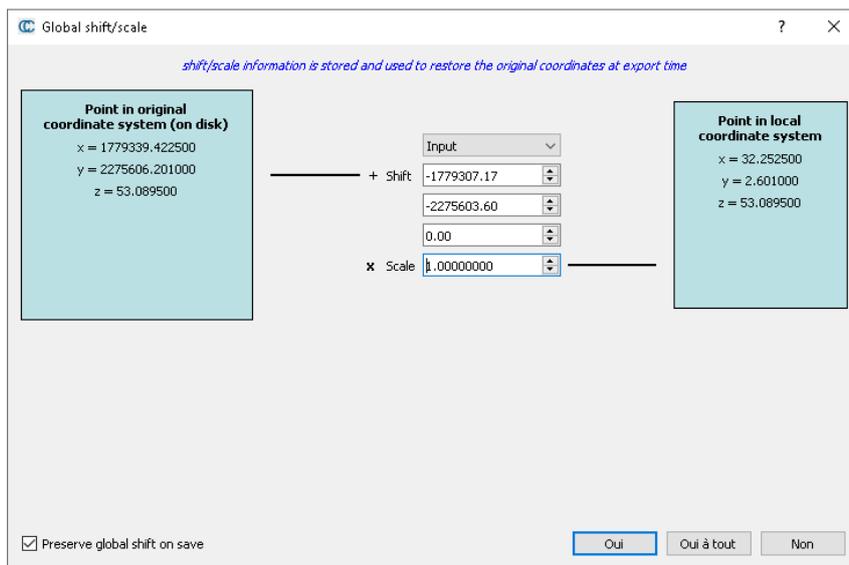


Figure 3.1 : Translation lors de l'import de fichiers dans CC

2. Ensuite, en utilisant la fonction *extract section along polyline* de CC, on génère des sections du nuage orthogonalement à l'axe de la rue tel qu'indiqué sur la figure 3.2. On peut par

exemple voir sur la figure 3.3 que dans le cadre de notre étude, nous avons généré des sections de 10 centimètres d'épaisseur et cela tous les 10 mètres le long de la polyligne.

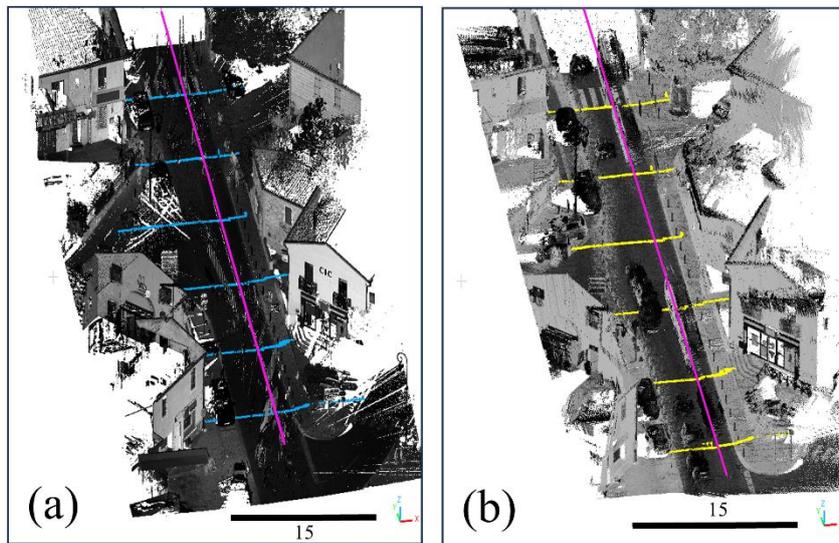


Figure 3.2 : Section le long de la polyligne rose dans le nuage de référence (a) et le nuage test (b)

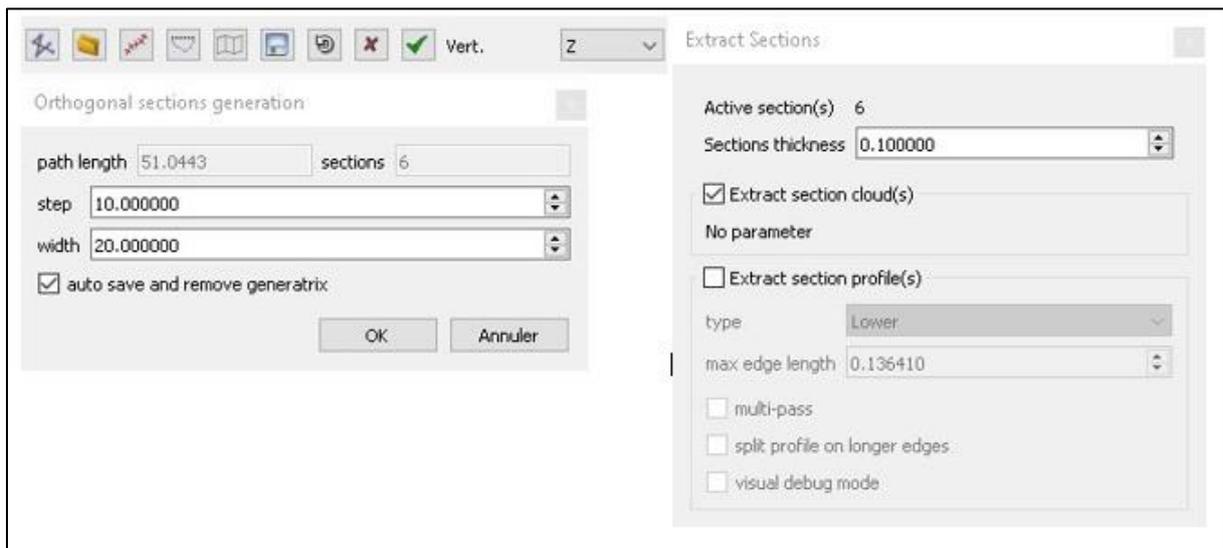


Figure 3.3 : Paramètres d'extraction des sections dans CC

3. Ensuite, on sépare les sections en profils horizontaux et en profils verticaux (figure 3.4) à l'aide de la fonction *CROSS SECTION*. On obtient ainsi des profils horizontaux et verticaux du nuage de référence et du nuage test. On procède ensuite

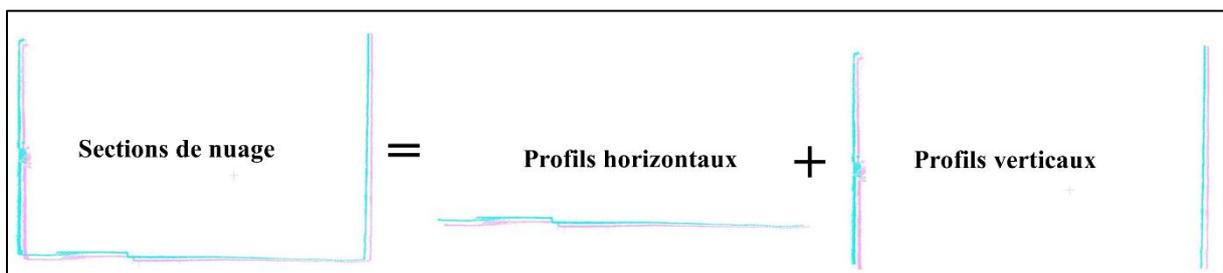


Figure 3.4 : Créations des profils horizontaux et verticaux

- Après ces étapes, on peut procéder à la comparaison des profils entre eux. Pour cela, on utilise la fonction Cloud-to-Cloud Distance de CloudCompare. Cette fonction compare un nuage de points P1 à un nuage de points de référence P2. Elle renvoie la distance moyenne entre P1 et P2 et l'écart type associé. Pour le calcul de la distance, nous avons choisi après plusieurs essais, un modèle basé sur plan ajusté par moindres carrés à partir des 6 points les plus proches. Se référer au [manuel de CloudCompare](#) pour plus d'informations sur les paramètres de cette fonction.

Il est possible d'exécuter cette fonction directement dans le logiciel ou encore à l'aide des [lignes de commande de CC](#). La difficulté avec ces deux méthodes réside dans le fait qu'il répéter la procédure pour chaque paire de nuage, ce qui est assez fastidieux au regard du nombre de profils que nous avons traités (plus de 500).

Nous avons donc écrit un script en batch interprétable par le « shell » dans lequel nous avons implémenté une boucle qui exécute la ligne de commande `-c2c_dist` et enregistre les résultats de la console dans un fichier texte. Par la suite, nous avons écrit un code python qui récupère ce fichier texte, extrait les informations utiles et les exporte dans un tableau csv. Les deux scripts sont consultables aux figures 3.5 et 3.6 respectivement.

```
setlocal EnableDelayedExpansion
set Compared=D:\tfe_moussa\new\TEST
set Reference=D:\tfe_moussa\new\REF

for %%f in ("%Reference%\*") do (
    "C:\Program Files\CloudCompare\cloudcompare.exe" -SILENT
    -AUTO_SAVE OFF -O %Compared%\%%~nxf -O %Reference%\%%~nxf
    -c2c_dist -MAX_TCOUNT 18 -model LS KNN 6
) >> "D:\tfe_moussa\new\OUTPUT\output25.txt"
```

Figure 3.5 : Script batch (.bat) pour calculer la distance entre les profils tests et de référence

```

import csv

input_file = "output25.txt"
output_file = "output2.csv"

def tri_1(input_file) :

    # Ouvrir le fichier d'entrée en mode lecture
    with open(input_file, 'r') as file:
        # Lire toutes les lignes du fichier
        lines = file.readlines()

    # Filtrer les lignes qui commencent par "Opening file: " ou "[ComputeDistances] Mean distance"
    filtered_lines = [line for line in lines if line.startswith("Opening file: ")
or line.startswith("[ComputeDistances] Mean distance")]

    return filtered_lines

#####

# Variables pour stocker les valeurs de ref et mean
ref_values = []
mean_values = []

lines = tri_1(input_file)

# Parcourir les lignes du fichier d'entrée
for i in range(0, len(lines), 3):
    line1 = lines[i].strip()
    line3 = lines[i + 2].strip()

    # Extraire les valeurs de ref
    ref = line1[46:-1]
    ref_values.append(ref)

    # Extraire les valeurs de mean
    mean = line3[35:42]
    mean_values.append(mean)

# Écrire les valeurs dans un fichier CSV
with open(output_file, 'w', newline='') as file:
    writer = csv.writer(file, delimiter=';')
    writer.writerow(["ref", "mean"]) # Écrire les en-têtes de colonnes

    # Écrire les valeurs de ref et mean dans les lignes suivantes
    for ref, mean in zip(ref_values, mean_values):
        writer.writerow([ref, 100* float(mean)])

print("Le traitement est terminé. Les valeurs ont été exportées dans le fichier CSV.")

```

Figure 3.6 : Script python pour exporter la distance entre les profils tests et de référence dans un tableau csv

#### Annexe 4 : Écarts en cm obtenus suites aux différentes expériences en extérieur

Profils	ZONE A					
	Écarts altimétriques en cm			Écarts planimétriques en cm		
	GPS+IMU	Basic slam	Advanced slam	GPS+IMU	Basic slam	Advanced slam
P1	5.3	5.7	5.4	1.9	3.3	3.3
P2	4.3	4.9	4.9	2.6	4.6	4.6
P3	5.3	5.7	5.3	2.4	2.4	2.4
P4	3.0	6.5	6.5	4.1	15.7	15.7
P5	3.4	7.4	7.2	3.0	4.9	4.9
P6	4.1	11.6	11.7	4.3	12.2	12.2
P7	4.6	7.0	7.0	4.3	11.0	11.0

P8	6.0	9.6	9.3	5.1	21.4	21.4
P9	3.2	12.4	12.4	4.5	41.0	41.0
P10	3.0	18.7	18.7	4.0	63.9	63.9
P11	3.4	11.7	11.8	1.5	105.3	105.3
P12	4.6	39.6	39.6	2.9	104.4	104.4
P13	5.6	14.3	14.7	1.4	148.6	148.6
P14	8.5	33.5	33.5	5.6	44.7	44.7
P15	4.3	16.7	16.9	7.6	154.1	154.1
P16	4.5	58.2	58.3	9.8	175.9	175.9
P17	3.1	66.8	66.7	1.2	138.9	138.9
P18	3.8	27.3	27.5	5.1	43.6	43.6
P19	3.9	79.2	79.2	4.4	151.0	151.0
P20	5.3	122.1	121.7	2.1	333.0	333.0
P21	5.2	76.2	76.2	3.6	247.7	247.7
P22	2.2	46.1	46.0	1.3	192.8	192.8

**ZONE B**

Profils	Ecartés altimétriques en cm			Ecartés planimétriques en cm		
	GPS+IMU	Basic slam	Advanced slam	GPS+IMU	Basic slam	Advanced slam
P1	3.739	10.2	10.3	3.364	41.6	41.4
P2	4.566	19.4	19.4	2.733	78.7	78.6
P3	3.745	15.6	15.2	8.208	216.1	216.1
P4	6.252	19.6	19.5	3.566	58.6	58.6
P5	9.262	18.5	18.1	10.518	87.7	88.2
P6	6.679	22.1	22.1	3.179	52.2	52.4
P7	4.406	13.2	12.7	6.973	30.0	29.5
P8	4.72	10.5	11.0	1.565	5.5	5.5
P9	4.541	8.9	8.6	6.205	7.8	8.1
P10	2.464	13.7	13.7	1.302	18.1	18.4
P11	7.619	18.8	18.6	23.024	32.4	32.3

**LPM / LCPO**

Profils	Ecartés altimétriques en cm		Ecartés planimétriques en cm	
	LPM	LCPO	LPM	LCPO
P1	1.9	1.9	4.0	4.0
P2	3.3	4.3	6.3	4.2
P3	6.3	5.5	11.0	8.3
P4	5.3	10.0	4.3	1.0
P5	5.3	5.0	4.4	2.0
P6	4.3	4.3	3.8	3.1
P7	3.8	1.5	4.4	4.4
P8	3.9	3.9	6.8	5.0
P9	15.2	15.2	19.9	17.4
P10	11.1	18.0	7.3	7.4
P11	20.0	20.2	11.1	13.5
P12	27.6	32.4	10.3	7.8
P13	67.8	67.9	10.9	12.5
P14	23.4	31.3	18.7	19.8
P15	112.2	112.2	21.2	24.3
P16	138.8	138.7	32.8	31.1
P17	123.8	123.8	17.1	18.8
P18	176.3	178.0	35.6	35.6
P19	120.3	118.3	49.2	44.4
P20	223.5	221.3	47.2	43.4
P21	111.6	111.2	9.8	9.8
P22	244.3	244.3	14.9	14.9

**ZONE C**

Profils	Ecartés altimétriques en cm	Ecartés planimétriques en cm
P1	2.4	4.8
P2	2.7	6.3
P3	3.2	6.1
P4	3.0	8.6
P5	8.6	9.4
P6	2.3	7.2
P7	5.3	9.4
P8	7.7	6.5
P9	21.9	8.9
P10	17.8	28.4
P11	22.3	13.4
P12	67.1	11.5
P13	7.9	17.8
P14	29.9	29.6
P15	17.0	25.7
P16	36.4	22.6
P17	54.3	23.9

**VITESSE D'ACQUISITION**

Profils	Ecartés altimétriques en cm			Ecartés planimétriques en cm		
	1.2 m/s	1.5 m/s	2 m/s	1.2 m/s	1.5 m/s	2 m/s
P1	5.327	4.0	3.8	3.3	1.9	1.6

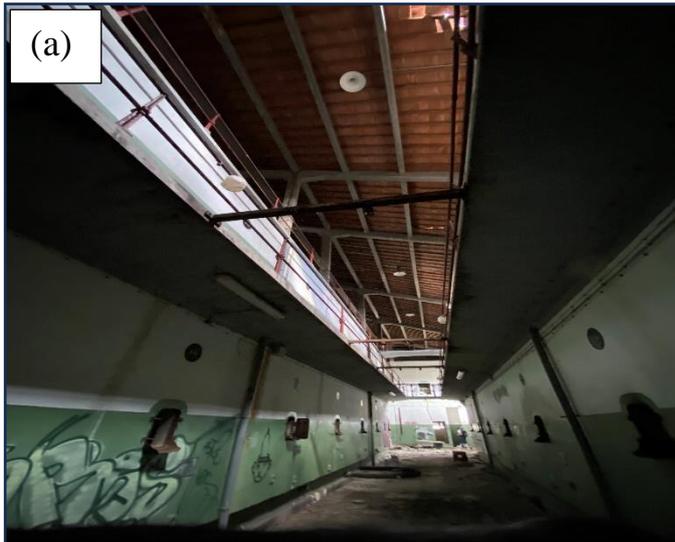
P2	5.124	6.3	6.1	4.4	3.3	2.7
P3	5.366	11.0	9.2	2.3	6.3	6.0
P4	5.885	4.3	3.7	15.7	5.3	8.5
P5	9.321	4.4	4.5	3.8	5.3	3.7
P6	10.23	3.8	4.8	12.4	4.3	2.8
P7	9.877	4.4	5.6	22.3	3.8	5.2
P8	8.567	6.8	4.7	41.3	3.9	4.2
P9	5.333	19.9	17.3	44.0	15.2	19.5
P10	20.873	7.3	6.8	61.2	11.1	11.5
P11	13.378	11.1	7.6	106.0	20.0	16.0
P12	26.945	10.3	9.5	100.1	27.6	28.9
P13	12.986	10.9	10.5	148.8	67.8	65.9
P14	31.163	18.7	18.1	42.2	23.4	21.3
P15	11.171	21.2	34.4	148.6	112.2	113.9
P16	36.345	32.8	39.0	107.6	138.8	143.7
P17	42.755	17.1	15.6	114.1	123.8	124.9
P18	26.075	35.6	35.4	38.8	176.3	178.2
P19	48.952	49.2	55.5	9.2	120.3	105.4
P20		47.2	62.7	109.2	223.5	224.1

**NATURE DE LA TRAJECTOIRE**

Profils	Ecart altimétriques en cm			Ecart planimétriques en cm		
	Trajectoire normale	Trajectoire en Zig Zag	Trajectoire bouclée	Trajectoire normale	Trajectoire en Zig Zag	Trajectoire bouclée
P1	10.3	5.0	2.7	41.6	2.4	4.6
P2	19.4	4.8	3.7	78.7	5.8	7.2
P3	15.2	3.7	5.0	216.1	71.0	13.6
P4	19.5	7.6	5.5	58.6	5.8	12.8
P5	18.1	9.8	5.6	87.7	19.0	8.0
P6	22.1	6.9	8.3	52.2	7.1	71.2
P7	12.7	4.4	5.6	30.0	8.0	23.9
P8	11.0	5.2	4.8	5.5	3.9	14.0
P9	8.6	5.9	6.0	7.8	6.4	2.7
P10	13.7	9.9	6.5	18.1	13.7	7.8
P11	18.6	16.3	9.1	32.4	29.2	13.0
P12			5.6			20.0
P13			10.7			20.2
P14			8.9			10.5
P15			6.3			9.2

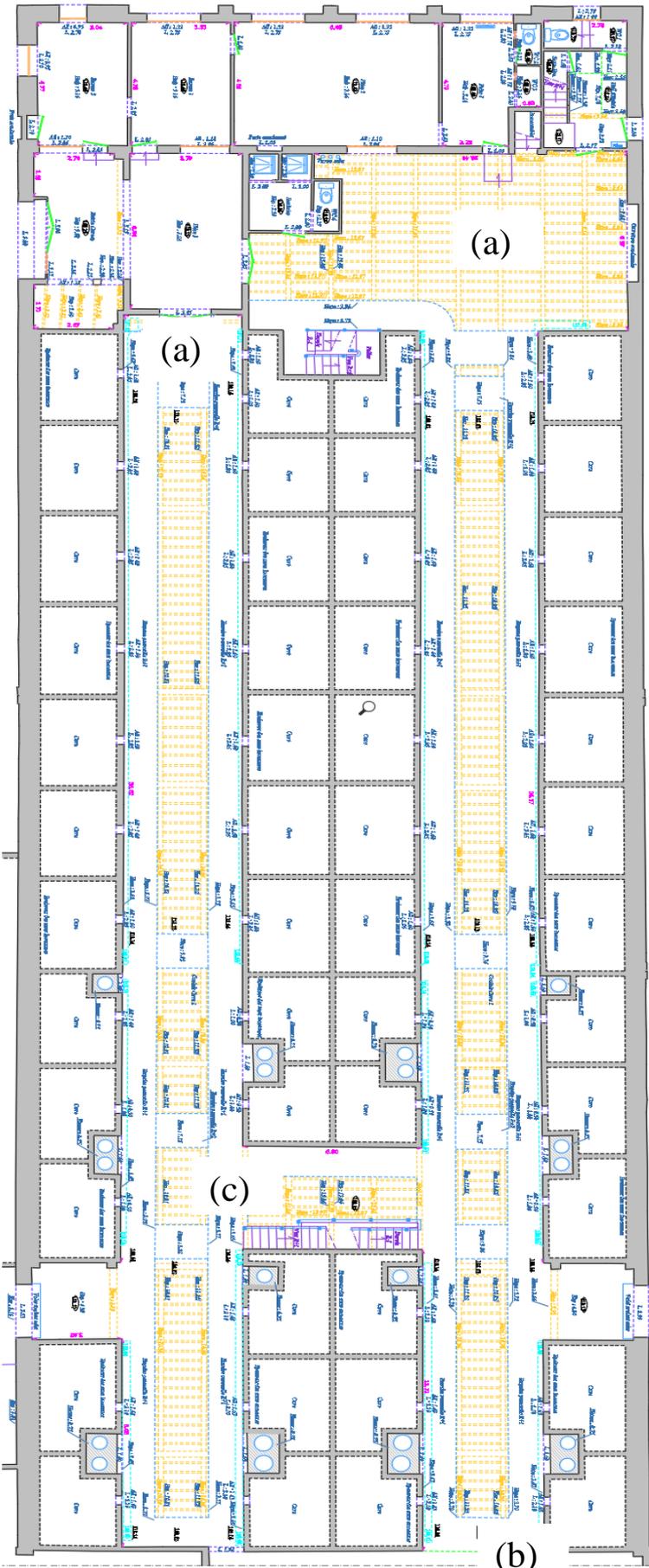
*Tableau 4.1 : Ecart obtenus lors des différentes expériences en extérieur*

**Annexe 5 : Plans d'intérieur et photos de la cave coopérative de Montarnaud**



- (a) Long couloir vide mentionné en II.2.4.2
- (b) Changement d'opérateur et exemple de l'irrégularité du sol
- (c) Cage d'escaliers étudiée
- (d) Exemple d'irrégularité du plancher d'état abandonné du bâtiment
- (e) Image du R+1

Figure 5.1 : Photos de la cave coopérative de Montarnaud



Nota : Système de coordonnées planimétriques RGF93 projection CC43  
 Altitudes rattachées au NGF à l'aide du réseau Téria  
 Nota 2 : Les hauteurs situées dans les couloirs cuxes 1 et 2 ont comme références les cotes altimétriques du centre des couloirs.



**Légende**

	Mur		Escaliers
	Mur avec hauteur		Porte
	Mur non relevé car inaccessible / pièce fermée		
	Poutre		
	Linéau		
	Cantiveau		
	Garde Corps		
	Changement HSP		
	Emprise Passerelle R+1/R+2		
	Habillage		
	Cotation des pièces		
	Altitude dalle	Hauteur : 3.04	Hauteur sur mur
	Altitude	HSP : 3.04	Hauteur sous passerelle
	Altitude	L : 2.05	Hauteur sous plafond
	Altitude	HSPO : 3.04	Linéau
	Altitude	L : 3.15	Hauteur sous poutre
	Altitude		Allège / Linéau

Figure 5.2 : Plan de niveau du RDC de la cave coopérative de Montarnaud et emplacement des photos.

---

## RESUME

Le Leica Pegasus Backpack est un scanner dynamique qui permet de numériser une scène dans un délai réduit. Il utilise pour cela une antenne GNSS et une centrale inertielle pour déterminer sa trajectoire des relevés en extérieur. Cependant, dans les zones où le signal GNSS est partiellement compromis, ce scanner ne parvient pas à fournir des données avec une précision satisfaisante. On s'interroge donc dans cette étude sur la possibilité de pallier cette faiblesse du backpack par le fait de calculer la trajectoire du backpack avec le SLAM dans cette de faible réception GNSS. Cette étude a également visé à déterminer les performances du Pegasus Backpack dans le cadre d'un levé d'intérieur. L'objectif final de ce travail a été d'identifier un logiciel qui permettrait d'optimiser la phase DAO des données du scanner par l'automatisation de certaines étapes.

**Mots Clés : Leica Pegasus Backpack, Système de cartographie mobile, MMS, Scanners dynamiques, SLAM, géoréférencement direct, Cloud2Map, Classification, Cyclone 3DR.**

---

## SUMMARY

The Leica Pegasus Backpack, a dynamic scanner, excels in rapidly capturing scenes. This performance is achieved through a GNSS antenna and an inertial unit that calculates the scanner's trajectory during outdoor surveys. However, in areas where the GNSS signal is compromised, this scanner fails to provide data with satisfactory precision. It is within this context that this study explores the possibility of overcoming this limitation by recalculating the backpack's trajectory using SLAM, particularly in cases of weak GNSS reception. The study also aims to evaluate the performance of the Pegasus Backpack in indoor survey scenarios. The third objective of this research is to identify software capable of enhancing the data processing phase of the scanner by automating certain crucial steps.

**Key words: Leica Pegasus Backpack, Mobile Mapping System, MMS, Dynamic scanner, SLAM, direct georeferencing, Cloud2Map, Classification, Cyclone 3DR.**

---