

Détermination de positions précises à l'aide des données bifrèquence issues de smartph

Auteur : Debelle, Mathilde

Promoteur(s) : Warnant, René

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en sciences géographiques, orientation géomatique et géométrologie, à finalité spécialisée

Année académique : 2018-2019

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/6956>

Avertissement à l'attention des usagers :

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

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



UNIVERSITÉ DE LIEGE
Faculté des Sciences
Département de géographie

Détermination de positions précises à l'aide des données bifréquence issues de smartphones

Mémoire présenté par :

Mathilde DEBELLE

Pour l'obtention du titre de :

**Master en Sciences géographiques, orientation géomatique et
géométrologie, à finalité spécialisée**

Année académique :

2018 - 2019

Date de défense :

Juin 2019

Membres du jury :

Pr. R. Warnant (Promoteur)

Pr. R. Billen (Lecteur)

Pr. A. Demoulin (Lecteur)

Remerciements

Je tiens premièrement à remercier mon promoteur, M. Warnant, pour sa disponibilité, son suivi tout au long de l'année et pour ses précieux et nombreux conseils.

Je souhaite également remercier l'unité de géomatique qui, bien qu'elle n'ait pas directement participé à l'élaboration de ce mémoire, a toujours été bienveillante.

Je voudrais remercier mes amis, namurois et liégeois, pour toute l'aide et la bonne humeur qu'ils m'ont apportées.

Enfin, je souhaite remercier mes parents et mes sœurs pour leur soutien et leur implication dans ce mémoire et tout au long de mon cursus.

Résumé

Tous les smartphones sont capables de calculer leur position grâce à une puce GNSS. Actuellement, de nombreuses applications exploitent ce positionnement, même si sa précision et son exactitude peuvent être décamétriques (Zhang *et al.*, 2018). Réussir à obtenir un positionnement de meilleure qualité aurait un impact sur l'économie mondiale (Humphreys *et al.*, 2016).

Depuis mai 2016, les données brutes provenant des récepteurs GNSS des smartphones sont disponibles (GSA, 2018). Cet accès a permis de nombreuses améliorations en termes de précision et d'exactitude des positions.

En mai 2018, la société chinoise Xiaomi a sorti le premier smartphone possédant un récepteur bifréquence : le Xiaomi Mi 8 (Xiaomi, 2018).

Ce travail a pour objectif d'estimer la qualité des observables et le gain en précision et en exactitude qu'il est possible d'obtenir en utilisant un smartphone nouvelle génération possédant une puce GNSS bifréquence (L1-L5/E1-E5) comme le Xiaomi Mi 8.

La méthodologie utilisée est réalisée dans trois environnements différents : une cage de Faraday connectée à une antenne géodésique, le toit du bâtiment B5a de l'Université de Liège sur le campus du Sart-Tilman et un jardin de la commune de Neupré.

La qualité des observables est obtenue en réalisant des doubles différences et appliquant la loi de la propagation des erreurs.

Les performances du récepteur bifréquence du Xiaomi Mi 8 sont évaluées en comparant les positions calculées par ce récepteur et par ceux du Samsung S8 et de l'Huawei Mate 20 Pro. Le gain en précision et en exactitude du positionnement avec les données brutes est obtenu en appliquant sur ces données mono et bifréquences différentes techniques de positionnement (Single Point Positioning (SPP), positionnement différentiel (DGNSS) et positionnement relatif à l'aide du logiciel RTKLib.

Les résultats obtenus permettent de conclure que les observables du Xiaomi Mi 8 sont significativement plus précises que celles des smartphones d'anciennes générations. Cela est en partie lié à la capacité du récepteur à gérer la fréquence L5/E5. Les phases ont une précision de l'ordre du centimètre. Les codes, plus sensibles au multitrajet, ont une précision entre 0,10 et 10 mètres selon l'environnement.

En utilisant le logiciel RTKLib, l'apport de la deuxième fréquence n'améliore pas de manière significative les résultats de positionnement. Il peut même parfois les dégrader. Cependant, l'accès aux données brutes du Xiaomi Mi 8 permet d'obtenir, dans certains environnements, des positions ayant une précision et une exactitude centimétriques.

Certaines limitations induites par la méthode, les expériences et le logiciel RTKLib sont à prendre en considération lors de l'analyse de ces résultats.

Abstract

All smartphones are able to calculate their position thanks to a GNSS chip. Currently, many applications exploit this positioning, even if its precision and accuracy can be decametric (Zhang et al., 2018). Achieving better quality positioning would have an impact on the global economy (Humphreys et al., 2016).

Since May 2016, raw data from the GNSS receivers of smartphones are available (GSA, 2018). This access has enabled many improvements in terms of precision and accuracy of positions. In May 2018, the Chinese company Xiaomi released the first Smartphone with a dual frequency receiver: the Xiaomi MI 8 (Xiaomi, 2018).

The objective of this work is to estimate the quality of the observables and the gain in precision and accuracy that can be obtained by using a new generation Smartphone with a dual-frequency GNSS chip (L1-L5/E1-E5) such as the Xiaomi MI 8.

The methodology used is carried out in three different environments: a RF-shielded box connected to a geodetic antenna, the roof of the B5a building of the University of Liège on the Sart-Tilman campus and a garden of the Neupré municipality.

The quality of the observables is obtained by performing double differences and applying the law of the error propagation. The performance of the Xiaomi MI 8 dual frequency receiver is evaluated by comparing the positions calculated by this receiver and those of the Samsung S8 and Huawei mate 20 Pro. The gain in precision and accuracy of the positioning with the raw data is obtained by applying, on mono and dual-frequency raw data, different positioning techniques (single point positioning (SPP), differential positioning (DGNSS) and relative positioning) using the RTKLib software.

The results obtained allow to conclude that the observables of Xiaomi MI 8 are significantly more accurate than those of older generation smartphones. This is partly related to the receiver's ability to manage the L5/E5 frequency. The phases have precision of the order of the centimetre. The codes, more sensitive to multipath, have a precision between 0,10 and 10 meters depending on the environment.

Using the RTKLib software, the input of the second frequency does not significantly improve the positioning results. It can even degrade them sometimes. However, access to the raw data of the Xiaomi MI 8 allows to obtain positions with centimetric precision and accuracy depending on the environment. Some limitations induced by the method, the experiments and the RTKLib software must be taken into consideration when analyzing these results.

Table des matières

Remerciements	1
Résumé	2
Abstract.....	3
Table des Figures	7
Liste des Tableaux	9
Liste des abréviations et des acronymes.....	11
1. Introduction.....	12
2. État de l'art.....	14
2.1 Théorie.....	14
Les observables	14
Les techniques de positionnement	15
2.2 Constellations GPS et Galileo	17
2.3 Positionnement avec récepteurs géodésiques bifrèquence (L1+L5).....	18
2.4 Positionnement avec smartphones.....	19
Problèmes liés à l'utilisation des smartphones.....	19
Positionnement interne	20
Données brutes monofrèquence	20
Données brutes bifrèquence.....	21
3. Hypothèses de recherche.....	23
4. Environnement de travail	24
4.1 Appareil de récolte de données	24
Smartphones	24
Récepteurs géodésiques	25
4.2 Logiciel RTKLib.....	25
4.3 Configuration des tests.....	26
5. Méthode.....	28
5.1 Définition des environnements	28
Cage de faraday	28
Toit du bâtiment B5a	28
Jardin de Neupré.....	30
5.2 Qualité des observables	30
5.3 Qualité du positionnement	32
Positionnement interne	32
Positionnement avec les données brutes	33
6. Résultats.....	36
6.1 Récepteurs géodésiques	36

Qualité des observables	36
Qualité du positionnement.....	38
6.2 Cage de Faraday	41
Qualité des observables	41
Positionnement interne	43
Positionnement avec les données brutes	45
6.3 Toit du bâtiment B5a.....	50
Qualité des observables	50
Positionnement interne	52
Positionnement avec les données brutes	54
6.4 Jardin de Neupré	57
Qualité des observables	57
Positionnement interne	60
Positionnement avec les données brutes	61
7. Discussion.....	65
7.1 Qualité des observables	65
7.2 Qualité du positionnement interne	66
7.3 Résultats des données brutes	67
Influence des centres de phase.....	67
Exactitude dans la cage de Faraday	67
Exactitude sur le toit du bâtiment B5a	69
7.4 Qualité du positionnement avec les données brutes	69
Influence de la qualité du récepteur.....	69
Influence de l'environnement	70
Influence de la technique de positionnement	70
Influence de l'exploitation du bifrèquence	71
Conclusion de la qualité du positionnement avec les données brutes.....	72
7.5 Comparaison du positionnement interne et du positionnement avec les données brutes	73
7.6 Limitations.....	73
Détermination de la qualité des observables	73
Set-up des expériences.....	73
Logiciel RTKLib	74
8. Conclusion et perspectives.....	75
8.1 Conclusion	75
8.2 Perspectives	76
9. Bibliographie.....	77

10.	Annexes	79
10.1	Annexe 1 : période de récolte de données.....	79
10.2	Annexe 2 : Diminution du nombre de positions calculées dans l'environnement du jardin 80	
10.3	Annexe 3 : Règle empirique de l'influence de la position a priori dans le DGNSS et le positionnement relatif (Warnant, 2017).....	82
10.4	Annexe 4 : Doubles différences entre récepteurs géodésiques avec 50 cm d'erreur en Y 83	
10.5	Annexe 5 : Positionnement relatif entre récepteur géodésique et smartphone avec le logiciel en développement à l'unité de géomatique.....	84
10.6	Annexe 6 : Modification des options d'antennes.....	85
10.7	Annexe 7 : Modification des options de tolérances	86

Table des Figures

Figure 1: Set-up expérimental sur le toit du B5a ; composantes Norht et East de la ligne de base	29
Figure 2: Set-up expérimental dans un jardin en milieu rural.....	30
Figure 3: Double différence de codes Galileo (E5a) entre X400 et X501 et les satellites E5 et E3 au DOY 094m (Échelle : 0,60 m)	37
Figure 4: Double différence de phases Galileo (E5a) entre X400 et X501 et les satellites E5 et E3 au DOY 094m (Échelle : 0,04 cycle).....	37
Figure 5: SPP du récepteur X400 avec les constellations GPS et Galileo au jour 246k.....	38
Figure 6: DGNSS (L1-L5/E1-E5) des récepteurs X400-X501 avec les constellations GPS et Galileo au jour 246k	39
Figure 7: Positionnement relatif (L1-L5/E1-E5) des récepteurs X400-X501 avec les constellations GPS et Galileo au jour 246k.....	40
Figure 8: Double différence de codes Galileo (E5a) entre XIMA et XIMB et les satellites E5 et E3 dans la cage de Faraday au DOY 094m (Échelle : 8m).....	42
Figure 9: Double différence de phases Galileo (E5a) entre XIMA et XIMB et les satellites E5 et E3 dans la cage de Faraday au DOY 094m (Échelle : 0,2 cycle).....	42
Figure 10: Positionnement interne du XIM8 et du SAS8 au jour 130m dans la cage de Faraday..	44
Figure 11: Position interne du XIM 8 au jour 091o dans la cage de Faraday.....	44
Figure 12: SPP du XIM8 avec les constellations GPS et Galileo au jour 094m dans la cage de Faraday.....	45
Figure 13: DGNSS (L1-L5/E1-E5) XIMA et XIMB avec les constellations GPS et Galileo au jour 094m dans la cage de Faraday.....	47
Figure 14: Positionnement relatif (L1-L5/E1-E5) XIMA et XIMB avec les constellations GPS et Galileo au jour 094m dans la cage de Faraday.....	49
Figure 15: Double différence de phases Galileo (E1) entre XIMA et XIMB et les satellites E1 et E26 sur le toit du bâtiment B5a au DOY 246m (Échelle : 0,2 cycle)	51
Figure 16: Double différence de phases Galileo (E1) entre XIMA et XIMB et les satellites E1 et E3 sur le toit du bâtiment B5a au DOY 246m (Échelle : 40 cycles)	51
Figure 17: Positionnement interne du XIM 8, du SAS8 et du HM20 au jour 049n sur le toit du bâtiment B5a.....	53
Figure 18: SPP du XIM8 avec les constellations GPS et Galileo au jour 246k sur le toit du bâtiment B5a	54
Figure 19: DGNSS (L1-L5/E1-E5) XIMA et XIMB avec les constellations GPS et Galileo au jour 246k sur le toit du bâtiment B5a.....	55
Figure 20: Positionnement relatif (L1-L5/E1-E5) XIMA et XIMB avec les constellations GPS et Galileo au jour 246k sur le toit du bâtiment B5a	56
Figure 21: Double différence de codes GPS (L1) entre XIMA et XIMB et les satellites G30 et G15 dans le jardin au DOY 048l (Échelle : 32m).....	58

Figure 22: Double différence de phases GPS (L1) entre XIMA et XIMB et les satellites G30 et G15 dans le jardin au DOY 048l (Échelle : 0,4 cycle)	58
Figure 23: Double différence de phases GPS (L1) entre XIMA et XIMB et les satellites G30 et G13 dans le jardin au DOY 048l avec sauts de cycles (Échelle : 20 cycles)	59
Figure 24: Positionnement interne du XIM8 et du SAS8 au jour 048l dans le jardin par rapport à la moyenne mise à zéro du XIM8.....	60
Figure 25 : SPP du XIM 8 avec les constellations GPS et Galileo au jour 048l dans le jardin.....	61
Figure 26: DGNSS (L1-L5/E1-E5) XIMA et XIMB avec les constellations GPS et Galileo au jour 048l dans le jardin.....	63
Figure 27: Positionnement relatif (L1-L5/E1-E5) XIMA et XIMB avec les constellations GPS et Galileo au jour 048l dans le jardin	64

Liste des Tableaux

Tableau 1: Exactitude NEU en fonction du modèle appliqué.....	27
Tableau 2: Précision des positionnements et différences des résultats obtenus.....	29
Tableau 3: Résumé des tests de positionnements réalisés.....	35
Tableau 4: Résumé des composantes NEU des lignes de base.....	35
Tableau 5: Précisions moyennes des codes et des phases des récepteurs géodésiques pour les constellations GPS et Galileo et pour les fréquences L1/E1 et L5/E5a.....	36
Tableau 6: Précisions et exactitudes moyennes du SPP avec les récepteurs géodésiques pour les jours 246k, 246m et 094m.....	38
Tableau 7: Précisions et exactitudes moyennes du DGNSS avec les récepteurs géodésiques pour les jours 246k, 246m et 094m.....	39
Tableau 8: Précisions et exactitudes moyennes du positionnement relatif avec les récepteurs géodésiques pour les jours 246k, 246m et 094m.....	40
Tableau 9: Précisions moyennes des codes et des phases pour les constellations GPS et Galileo et pour les fréquences L1/E1 et L5/E5a dans la cage de Faraday.....	41
Tableau 10: Précisions et exactitudes du positionnement interne des smartphones pour les jours 091o et 130m dans la cage de Faraday.....	43
Tableau 11: Précisions et exactitudes moyennes du SPP avec les données du Xiaomi Mi 8 pour les jours 094i, 094m et 095g dans la cage de Faraday.....	45
Tableau 12: Précisions et exactitudes moyennes du DGNSS avec les données du Xiaomi Mi 8 pour les jours 094i, 094m et 095g dans la cage de Faraday.....	46
Tableau 13: Précisions et exactitudes moyennes du positionnement relatif avec les données du Xiaomi Mi 8 pour les jours 094i, 094m dans la cage de Faraday.....	48
Tableau 14: Précision et exactitude moyennes du positionnement relatif avec les données du Xiaomi Mi 8 pour le jour 127i - influence des centres de phases des Xiaomi Mi 8.....	49
Tableau 15: Précisions moyennes des codes et des phases pour les constellations GPS et Galileo et pour les fréquences L1/E1 et L5/E5a sur le toit du bâtiment B5a.....	50
Tableau 16: Précisions et exactitudes du positionnement interne des smartphones pour les jours 091o et 049n sur le toit du bâtiment B5a.....	52
Tableau 17: Précisions et exactitudes moyennes du SPP avec les données du Xiaomi Mi 8 pour les jours 246k, 246m, 045j et 049n sur le toit du bâtiment B5a.....	54
Tableau 18: Précisions et exactitudes moyennes du DGNSS avec les données du Xiaomi Mi 8 pour les jours 246k, 246m, 045j et 049n sur le toit du bâtiment B5a.....	55
Tableau 19: Précisions et exactitudes moyennes du positionnement relatif avec les données du Xiaomi Mi 8 pour les jours 246k, 246m, 045j et 049n sur le toit du bâtiment B5a.....	56
Tableau 20: Précisions moyennes des codes et des phases pour la constellation GPS et pour la fréquence L1 dans le jardin de la commune de Neupré.....	57
Tableau 21: Précisions du positionnement interne des smartphones pour les jours 048l dans le jardin.....	60

Tableau 22 : Précisions du SPP avec les données du Xiaomi Mi 8 pour le jour 048l dans le jardin	61
Tableau 23: : Précisions et exactitudes du DGNSS avec les données du Xiaomi Mi 8 pour le jour 048l dans le jardin.....	62
Tableau 24: Précisions et exactitudes du positionnement relatif avec les données du Xiaomi Mi 8 pour le jour 048l dans le jardin.....	64

Liste des abréviations et des acronymes

DD : Double Difference

DGNSS : Positionnement différentiel

DOY : Day of Year

GNSS : Global Navigation Satellite System

HM20 : Smartphone Huawei Mate 20 Pro

NEU : North East Up

PDOP : Position Dilution Of Precision

PPP : Precise Point Positioning

RINEX Format : Receiver Independent Exchange Format

SAS8 : Smartphone Samsung S8

SPP : Single Point Positioning

X400 : Récepteur Septentrio relié à l'antenne ULG0

X501 : Récepteur Septentrio relié à l'antenne ULG1

XIM8 : Xiaomi Mi 8 lorsqu'un seul smartphone est utilisé

XIMA : Premier smartphone Xiaomi Mi 8 lorsque deux smartphones sont utilisés

XIMB: Deuxième smartphone Xiaomi Mi 8 lorsque deux smartphones sont utilisés

1. Introduction

Le premier smartphone possédant une puce GPS a été développé en 1999 par la compagnie Benefon (Benefon, 1999). En vingt ans, de nombreuses évolutions technologiques se sont produites.

Aujourd'hui, tous les smartphones sont équipés d'une puce GNSS. Cela permet à de nombreuses applications d'exploiter la position des utilisateurs, comme, par exemple, la météo et les réseaux sociaux. Ces applications ne nécessitent pas d'avoir des positions précises et exactes (Banville et van Diggelen, 2016). Cependant, la qualité de l'antenne et du récepteur a longtemps été un frein au développement d'applications nécessitant des positions précises et exactes. La précision était alors d'une dizaine de mètres (Zhang *et al.*, 2018). De plus, les chercheurs n'avaient pas accès aux observables (Humphreys *et al.*, 2016).

Réussir à obtenir des positions centimétriques aurait un impact important sur l'économie mondiale, permettant le développement de nouvelles applications (Humphreys *et al.*, 2016). Cela a poussé le développement de nouvelles technologies pour smartphones pouvant permettre de calculer des positions de meilleure qualité.

En mai 2016, la société Google a mis à la disposition des utilisateurs les données brutes de positionnement des smartphones et des tablettes tournant sous la version Android Nougat (7.0) ou sous les versions ultérieures (GSA, 2018). Ce nouvel accès a permis d'évaluer la précision des observables et d'améliorer la précision des résultats de positions. En effet, la précision est ainsi passée d'une dizaine de mètres au mètre (Zhang *et al.*, 2018).

Au mois de mai 2018, la société chinoise Xiaomi a annoncé, à Shenzhen, la sortie sur le marché de leur nouveau smartphone : le Xiaomi MI 8. Ce nouvel appareil est le premier smartphone au monde à contenir une puce GNSS bifréquence (Xiaomi, 2018).

Depuis, plusieurs smartphones possédant cette caractéristique ont été commercialisés sur le marché dont notamment le Huawei Mate 20 Pro (Huawei, 2018) et le nouveau Xiaomi Mi 9 (Xiaomi, 2019).

Depuis le début de l'introduction des puces GNSS dans les smartphones, de nombreux chercheurs ont évalué les performances atteignables par ces derniers en termes de positionnement. Les conclusions de ces recherches sont que la qualité des positions calculées s'améliore avec l'accès aux données brutes et l'avancement dans les technologies placées dans les appareils.

Bien que de nombreuses expériences aient déjà été réalisées, des tests avec des appareils plus récents dans un environnement contrôlé ou non doivent encore être réalisés (Gogoi *et al.*, 2019). L'arrivée des smartphones possédant une puce bifréquence est très récente. Les performances associées à ces appareils n'ont pas encore été pleinement évaluées.

Cette recherche a donc pour but de montrer la qualité des observables et le gain en précision et en exactitude qu'il est possible d'obtenir, dans des environnements différents comme une cage de Faraday, un toit ou un jardin, en utilisant un smartphone contenant une puce GNSS bifréquence. Cette recherche permet de compléter celles déjà réalisées sur le positionnement de smartphones mono et bifréquence. En effet, elle reprend des techniques de récolte de données et de calcul de positionnement qui n'ont pas encore été évaluées pour les smartphones exploitant deux fréquences.

Cette recherche répond à la question suivante : quel est le gain en précision et en exactitude lié à l'accès aux données brutes et à l'utilisation d'une puce GNSS bifréquence (L1/E1 et L5/E5) dans un smartphone utilisé dans des environnements différents ?

Ce mémoire est structuré en sept parties.

La première partie est consacrée à l'introduction de concepts théoriques nécessaires à la compréhension de la suite du mémoire. Elle fournit également un état de l'art des recherches effectuées sur le sujet, depuis les premiers résultats de positionnement internes aux smartphones jusqu'aux premières expériences réalisées avec un smartphone possédant une puce GNSS bifréquence.

La deuxième partie énonce les hypothèses formulées à la suite de l'état de l'art.

Quant à la troisième partie, elle décrit les choix posés dans le cadre des expériences. Ces derniers concernent les smartphones et les récepteurs géodésiques choisis pour la récolte de données, le logiciel utilisé pour calculer les positions et les configurations des calculs.

La partie suivante expose la méthodologie suivie pour vérifier les hypothèses.

La cinquième partie porte sur la présentation des résultats obtenus.

La sixième partie contient la discussion des résultats.

La dernière partie énonce les conclusions du travail effectué. Elle présente également les perspectives de la recherche.

2. État de l'art

2.1 Théorie

Les positions sont calculées grâce aux mesures de distances effectuées entre des satellites et des récepteurs. Ces dernières se basent sur les horloges. Au moins quatre satellites visibles simultanément sont nécessaires (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008).

Les observables

Il existe deux observables de base en GNSS permettant d'obtenir cette distance : les codes *pseudorange* et les phases *pseudorange* (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008).

Premièrement, les codes sont des séquences binaires définies par un algorithme et générées selon un *chipping rate*. Ce dernier détermine la longueur d'onde du code. La précision de cette observable est de l'ordre du centième de la longueur d'onde, en fonction du type de modulation appliqué.

La modélisation de cette observable $P_{A,k}^i$ (Équation 1) se fait en calculant l'intervalle de temps entre le temps d'émission par le satellite i et le temps de réception du signal par le récepteur A . L'indice k représente la fréquence du signal considéré (Sanz Subirana *et al.*, 2013).

$$P_{A,k}^i(t) = D_A^i + T_A^i + I_{A,k}^i + M_{A,k,p}^i + c \left(\Delta t^i(t_e) - \Delta t_A(t) \right) + \varepsilon_{A,k,p}^i \quad (1)$$

Le $\Delta t^i(t_e)$ représente l'erreur d'horloge du satellite au temps d'émission du signal par rapport à l'échelle de temps du GNSS considéré. Le $\Delta t_A(t)$ est l'erreur d'horloge du récepteur au temps de réception du signal par rapport à l'échelle de temps du GNSS considéré. En multipliant ces deux erreurs par la vitesse du signal dans le vide, c , l'erreur en mètre est obtenue.

Le terme D_A^i représente la distance géométrique entre le satellite i et le récepteur A .

Les termes T_A^i et $I_{A,k}^i$ représentent respectivement l'erreur troposphérique et l'erreur ionosphérique. L'erreur liée à la troposphère est due au passage du signal dans la couche neutre de l'atmosphère. Elle provoque un effet de retardement sur la mesure du signal émis. L'erreur ionosphérique est provoquée par le passage du signal dans l'ionosphère. Il s'agit d'une zone où l'ionisation est suffisamment importante pour perturber le passage du signal. L'effet est également un retardement dans la mesure du signal. L'effet de l'ionosphère dépend de la fréquence k , du signal.

Le terme $M_{A,k,p}^i$ représente le multitrajet. Il s'agit d'une erreur qui apparaît lorsque du signal indirect atteint l'antenne. Il dépend du milieu environnant de l'antenne. Ce paramètre est fonction de la nature de l'observable p , ici les codes, et de la fréquence du signal k . Pour les codes, il vaut entre un et deux mètres.

Le terme $\varepsilon_{A,k,p}^i$ est le bruit de mesure (Sanz Subirana *et al.*, 2013).

En plus des codes, un message de navigation est transmis du satellite au récepteur. Le message de navigation contient des informations concernant le satellite qui l'émet. Il fournit les paramètres d'éphémérides pour calculer les coordonnées des satellites, un modèle pour calculer l'erreur d'horloge du satellite et des paramètres de service pour obtenir, notamment, des informations concernant la santé des satellites (Sanz Subirana *et al.*, 2013).

Deuxièmement, les ondes porteuses permettent de transporter les codes et les messages de navigation. Ces ondes sont émises à une fréquence connue (Sanz Subirana *et al.*, 2013). La mesure du déphasage entre la phase de l'onde porteuse répliquée par le récepteur au temps t et la phase de l'onde porteuse émise par le satellite au temps t_e et reçue par le récepteur au temps t dépend du temps de propagation du signal. Par conséquent, cette mesure de déphasage permet

de calculer la distance entre le satellite et le récepteur (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008). Cette observable est plus précise que les codes.

La modélisation de la phase $\Phi_{A,k}^i$ (Équation 2) se fait en calculant le temps de propagation du signal à la fréquence k , entre le satellite i et le récepteur A (Sanz Subirana *et al.*, 2013).

$$\Phi_{A,k}^i(t) = D_A^i + T_A^i - I_{A,k}^i + M_{A,k,\Phi}^i + c \left(\Delta t^i(t_e) - \Delta t_A(t) \right) + \lambda_k N_{A,k}^i + \varepsilon_{A,k,\Phi}^i \quad (2)$$

Les termes permettant de modéliser cette observable sont similaires à ceux présents dans la modélisation des codes. Le multitrajet, $M_{A,k,\Phi}^i$, et le bruit de mesure, $\varepsilon_{A,k,\Phi}^i$, dépendant de la nature de l'observable Φ , sont différents. Pour les phases, le multitrajet est de l'ordre du centimètre. Le bruit est également plus faible.

Le terme $N_{A,k}^i$ représente l'ambiguïté initiale. Il s'agit du nombre entier de cycles de l'onde entre le satellite i et le récepteur k . Elle vient du fait que lorsque le déphasage est mesuré, seule la partie non entière du cycle peut être obtenue. En effet, il n'est pas possible de connaître le nombre entier de cycles de déphasage entre le signal arrivant du satellite et le signal de référence du récepteur lors de la première mesure. Elle est dite initiale, car si le suivi du signal n'est pas perdu par le récepteur, alors elle reste constante. Lorsque l'ambiguïté est résolue, le récepteur peut suivre et compter le nombre de cycles de déphasage qui s'écoule (Sanz Subirana *et al.*, 2013). Si le signal est perdu, l'ambiguïté doit être réinitialisée. Cela cause un saut dans le nombre entier de cycles. Ce phénomène est appelé un saut de cycles (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008).

Ce terme multiplié par la longueur d'onde, λ_k , correspond à l'ambiguïté en mètres (Sanz Subirana *et al.*, 2013).

Les phases sont donc plus précises, mais ambiguës par rapport aux codes (Sanz Subirana *et al.*, 2013).

Il est possible de caractériser le signal et le bruit grâce à la valeur du *Carrier to Noise*. Il est utilisé pour quantifier la puissance du signal reçu. S'il est inférieur à 34 dB, il est considéré comme faible (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008).

Ce paramètre est indépendant de la largeur de bande. La largeur de bande définit la distribution de l'énergie du signal entre deux fréquences limites (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008).

Les techniques de positionnement

Il existe plusieurs techniques de positionnement qui se basent toutes sur les observables de base (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008).

Le premier type de positionnement est dit absolu. Il s'agit d'un récepteur qui calcule sa propre position avec ses propres mesures. Cette technique est illustrée par le SPP qui se base sur les codes (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008).

Les erreurs provenant du milieu physique comme la troposphère et l'ionosphère peuvent être atténuées en utilisant des modèles. Le modèle de Saastamoinen permet de diminuer l'erreur troposphérique. L'erreur ionosphérique peut être réduite grâce au modèle de Klobuchar (Sanz Subirana *et al.*, 2013). Les coordonnées du satellite et le modèle de correction de l'erreur d'horloge du satellite sont fournis dans les éphémérides. L'erreur d'horloge du récepteur est estimée comme une inconnue avec les coordonnées du récepteur (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008).

Le deuxième type est le positionnement différentiel. Le récepteur (*rover*) calcule sa propre position avec ses propres mesures, mais en appliquant des corrections différentielles provenant d'une ou plusieurs stations de références (*base station*), dont la position exacte est connue. Ces corrections permettent d'améliorer la précision et l'exactitude de la position du récepteur (Hofmann-Wellenhof et al., 2008). Le DGNS est un exemple de technique basée sur ce principe et utilisant les codes (Takasu, 2013).

Tout d'abord, la distance entre le satellite i et le récepteur A de la station de référence, $D_A^i(t)$, est estimée sur base de la position connue du récepteur et de la position du satellite fournie dans les éphémérides.

Ensuite, le récepteur A de la station de référence calcule son code *pseudorange* au satellite i au temps t_0 , noté $P_A^i(t)$ (Équation 3). Les biais existant entre cette distance calculée et la distance estimée sont de trois types : dépendant du satellite i ($\Delta D^i(t)$), comme l'erreur d'horloge du satellite ; dépendant du récepteur A ($\Delta D_A(t)$), comme l'erreur d'horloge du récepteur et le multitrajet ; dépendant des deux ($\Delta D_A^i(t)$) comme l'erreur d'orbite, les effets de la troposphère et de l'ionosphère et les erreurs dans les éphémérides.

$$P_A^i(t) = D_A^i(t) + \Delta D^i(t) + \Delta D_A(t) + \Delta D_A^i(t) \quad (3)$$

Les corrections différentielles $DC^i(t)$ du récepteur A pour le satellite i au temps de t sont calculées (Équation 4).

$$DC^i(t) = D_A^i(t) - P_A^i(t) \quad (4)$$

$$DC^i(t) = -\Delta D^i(t) - \Delta D_A(t) - \Delta D_A^i(t)$$

Ces corrections sont appliquées au code *pseudorange* calculé entre le récepteur B, dont la position est inconnue, et le satellite i , $P_B^i(t)$. Cela permet d'obtenir un code *pseudorange* corrigé, $P_B^i(t)_{corr}$ (Équation 5).

$$P_B^i(t)_{corr} = P_B^i(t) + DC^i(t) \quad (5)$$

$$P_B^i(t)_{corr} = D_B^i(t) + (\Delta D^i(t) - \Delta D^i(t)) + (\Delta D_B(t) - \Delta D_A(t)) + (\Delta D_B^i(t) - \Delta D_A^i(t))$$

L'équation 5 permet de mettre en évidence que les erreurs dépendantes du satellite s'annulent. Il n'y a donc plus d'erreur d'horloge des satellites. Les erreurs dépendantes du satellite et du récepteur sont atténuées lorsque les deux récepteurs sont sur une courte ligne de base. Les erreurs troposphériques, ionosphériques et les erreurs d'orbites peuvent donc également être réduites. Les erreurs dépendantes du récepteur, erreurs d'horloge du récepteur et multitrajet, au contraire, se combinent. (Hofmann-Wellenhof et al., 2008).

Le troisième type est le positionnement relatif. Il nécessite les mesures de deux récepteurs placés sur une ligne de base. Les données collectées par la station de référence (*base station*), dont les coordonnées sont connues, et par le récepteur (*rover*), pour lequel les coordonnées sont inconnues, sont traitées ensemble afin d'obtenir la valeur des composantes de la ligne de base. Les coordonnées du récepteur peuvent ensuite être calculées (Hofmann-Wellenhof et al., 2008). Ce positionnement se base sur les phases.

L'utilisation de cette technique implique l'utilisation de doubles différences. Cette méthode se compose de deux étapes : la réalisation de simples différences et la formation de doubles différences.

Une simple différence, $\Phi_{AB}^i(t)$, est la différence de deux mesures de phases, $\Phi_A^i(t)$ et $\Phi_B^i(t)$, faites simultanément au temps t par deux récepteurs A et B suivant le même satellite i (Équation 6).

$$\Phi_{AB}^i(t) = D_{AB}^i(t) + T_{AB}^i(t) - I_{AB}^i(t) + M_{AB,\Phi}^i(t) + c((\Delta t^i(t_e) - \Delta t^i(t_e)) + (\Delta t_B(t) - \Delta t_A(t))) + \lambda_k N_{AB}^i + \varepsilon_{AB,\Phi}^i \quad (6)$$

$$\text{où } *_{AB}^i = *_{A}^i - *_{B}^i$$

Dans les simples différences, les erreurs d'horloge des satellites se suppriment si les mesures sont réalisées simultanément. Les erreurs troposphériques et ionosphériques sont également réduites si les deux récepteurs sont placés sur une courte ligne de base. Le multitrajet et le bruit des deux récepteurs sont combinés. Les erreurs d'horloge des récepteurs sont toujours présentes dans les simples différences (Garcia *et al.*, 2005).

Une double différence, $\Phi_{AB}^{ij}(t)$, est la différence de deux simples différences, $\Phi_{AB}^i(t)$ et $\Phi_{AB}^j(t)$, simultanées au temps t entre deux satellites, i et j, et deux récepteurs, A et B (Équation 7) (Humphreys *et al.*, 2016).

$$\Phi_{AB}^{ij}(t) = D_{AB}^{ij}(t) + T_{AB}^{ii}(t) - I_{AB}^{ij}(t) + M_{AB,\phi}^{ij}(t) + c \left((\Delta t_B(t) - \Delta t_A(t)) + (\Delta t_B(t) - \Delta t_A(t)) \right) + \lambda_k N_{AB}^{ij} + \varepsilon_{AB,\phi}^{ij}(t) \quad (7)$$

$$\Phi_{AB}^{ij}(t) = D_{AB}^{ij}(t) + T_{AB}^{ii}(t) - I_{AB}^{ij}(t) + M_{AB,\phi}^{ij}(t) + \lambda_k N_{AB}^{ij} + \varepsilon_{AB,\phi}^{ij}(t)$$

$$\text{où } *_{AB}^{ij} = *_{AB}^i - *_{AB}^j$$

Étant donné que les doubles différences proviennent de deux simples différences, les erreurs éliminées ou réduites dans les simples différences le sont également dans les doubles différences.

Grâce à la formation des doubles différences, les erreurs d'horloge des récepteurs sont supprimées, si les mesures sont faites simultanément. Le multitrajet et le bruit, combinés une première fois dans les simples différences, sont combinés une nouvelle fois dans les doubles différences (Garcia *et al.*, 2005).

Le positionnement relatif repose sur les mesures de phases. Cependant, la méthode des doubles différences peut également être réalisée sur les mesures de codes. Dans ce cas, une double différence, $P_{AB}^{ij}(t)$, est la différence de deux simples différences, $P_{AB}^i(t)$ et $P_{AB}^j(t)$, simultanées au temps t entre deux satellites, i et j, et deux récepteurs, A et B (Équation 8).

$$P_{AB}^{ij}(t) = D_{AB}^{ij}(t) + T_{AB}^{ii}(t) + I_{AB}^{ij}(t) + M_{AB,p}^{ij}(t) + \varepsilon_{AB,p}^{ij}(t) \quad (8)$$

Les erreurs supprimées ou réduites sont les mêmes que dans le cas des doubles différences de phases.

Chaque technique de positionnement peut être appliquée à une prise de données statique, où le récepteur reste fixe, ou cinématique, où le récepteur se déplace (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008).

2.2 Constellations GPS et Galileo

Le système GPS est géré par la Nasa, aux États-Unis (Thuy, 2017). Les premiers satellites envoyés en 1978 possédaient deux fréquences : L1 (1 575.42 MHz) et L2 (1 227.6 MHz). L1 est modulé par le *Coarse Acquisition code* (C/A Code) qui est un code civil, par le code de précision (P Code) qui est un code militaire, mais non classifié et par le message de navigation. L2 est modulé par le P Code et par le message de navigation. Depuis 1994, le mécanisme *Anti-Spoofing* est actif. Le *Spoofing* est un processus durant lequel quelqu'un ou quelque chose contrôle la position renvoyée par un appareil (Scott, 2013). Le P Code a été remplacé par le Y Code, qui est un code militaire classifié. Même si ce code est classifié, les récepteurs géodésiques sont capables de réaliser des pseudo-mesures du Y Code grâce à des techniques de traitement des signaux. La qualité de ces pseudo-mesures reste inférieure à celle obtenue lorsque le code est connu (Warnant, 2017).

En 2005, lors de la modernisation du système, une nouvelle fréquence d'émission a été ajoutée aux satellites, la fréquence L5 (1 176.450 MHz). De nouveaux codes, accessibles aux applications civiles ou non, ont été, ou vont être, modulés sur les fréquences L1, L2 et L5 (Sanz Subirana *et al.*, 2013).

Le système Galileo est européen et est géré par l'ESA . Les satellites, dont la phase *Full Operational Capabilities* (FOC) a démarré en 2014, émettent sur trois bandes de fréquences avec cinq fréquences porteuses : E1 (1 575.42 MHz), E6 (1 278.75 MHz), E5 (1 191.795 MHz), E5a (1 176.45 MHz) et E5b (1 207.140 MHz) (Sanz Subirana *et al.*, 2013).

Afin de transporter les codes, les ondes porteuses des constellations sont modulées. Les deux systèmes utilisent une modulation de phase. Cependant, les types de modulation appliqués sont différents. Le type AltBOC permet d'obtenir une erreur due au multitrajet plus faible et des codes plus précis. Cette modulation est présente sur la fréquence E5 de Galileo (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008).

2.3 Positionnement avec récepteurs géodésiques bifréquence (L1+L5)

Aujourd'hui, les récepteurs géodésiques sont capables d'exploiter du multi GNSS et du multi fréquence. Ces récepteurs sont les premiers dont les performances, en termes de qualité des observables et de positionnement, ont été étudiées.

Le développement de récepteurs géodésiques pouvant exploiter deux fréquences a permis d'améliorer le calcul de positionnement. Tout d'abord, cela permet de disposer de plus d'observables lors des calculs et des ajustements. Ensuite, cela a permis d'innover de nouvelles techniques pour, par exemple, éliminer la réfraction ionosphérique et résoudre les ambiguïtés (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008).

Les performances de ces récepteurs peuvent être évaluées en termes de qualité des observables et du positionnement.

Premièrement, la précision des observables de codes est d'un demi-mètre. Cela est obtenu en faisant des doubles de différences avec deux récepteurs géodésiques et en appliquant la loi de propagation des erreurs (Riley *et al.*, 2018).

Deuxièmement, des exactitudes et des précisions centimétriques, parfois millimétriques, sont atteintes pour les positions calculées. Ils permettent donc d'effectuer des travaux de précision (Pesyna *et al.*, 2014).

Ces performances sont atteintes grâce aux antennes utilisées avec ces récepteurs dans le cadre d'applications géodésiques. En effet, elles possèdent des caractéristiques permettant d'obtenir des positions précises et exactes.

Tout d'abord, elles sont caractérisées par un quasi-hémisphérique et uniforme *gain pattern* (Pesyna *et al.*, 2014). Il s'agit d'un terme qui décrit la dépendance à l'élévation de la puissance du signal reçu. Il faut que le *gain* soit suffisant afin d'avoir un *Carrier to Noise* qui permette de suivre les satellites (Moernaut et Orban, 2009). Le fait qu'il soit hémisphérique permet de ne pas prendre en compte les signaux qui proviennent d'en dessous de l'horizon et donc les signaux réfléchis sur le sol. Le multitrajet est donc partiellement filtré (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008). Ensuite, elles ont une polarisation circulaire droite (Pesyna *et al.*, 2014). Cela permet également de diminuer le multitrajet. En effet, le signal qui est réfléchi possède une polarisation circulaire gauche (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008).

Enfin, elles possèdent un centre de phase stable (Pesyna *et al.*, 2014).

2.4 Positionnement avec smartphones

Depuis plusieurs années, les chercheurs réalisent des expériences afin de mettre en évidence les performances atteignables avec les récepteurs placés dans les smartphones.

Avant 2016, les recherches évaluaient la qualité du positionnement interne. Il s'agit des positions directement calculées par le récepteur du smartphone, sans intervention extérieure. En effet, à cette époque, il n'était pas possible d'accéder aux données brutes du récepteur. La qualité des observables ne pouvait, par conséquent, pas être étudiée (Humphreys *et al.*, 2016).

En mai 2016, en plus de la position calculée directement par le récepteur du smartphone, les données brutes sont devenues accessibles aux utilisateurs (GSA, 2018). Des expériences évaluant la qualité des observables et la qualité du positionnement réalisé à partir de ces données ont alors débuté (Zhang *et al.*, 2018 ; Riley *et al.*, 2018).

Au cours du mois de mai 2018, le tout premier smartphone possédant une puce GNSS bifréquence a été annoncé. L'étude de la qualité du positionnement interne, calculé par le récepteur bifréquence, des données brutes bifréquence et du positionnement réalisé à partir de ces données est en cours (Robustelli *et al.*, 2019).

Problèmes liés à l'utilisation des smartphones

Les études réalisées afin d'évaluer les performances des positions internes des smartphones ou des positions calculées à partir des données brutes ont mis en évidence deux problèmes inhérents à l'utilisation des smartphones : le récepteur et l'antenne.

Premièrement, les puces GNSS présentes à l'intérieur des smartphones sont une des causes des difficultés à obtenir un positionnement précis et exact. Cela s'explique par différents éléments.

Tout d'abord, dans le cas de mesures de phases, des sauts de cycles surviennent plus régulièrement lorsqu'un récepteur d'un smartphone est utilisé par rapport à un récepteur géodésique. Cela rend leur gestion plus compliquée. Cela est dû à la mauvaise qualité de l'oscillateur à quartz *temperature-compensated*.

Ensuite, le récepteur du smartphone a été optimisé pour faire un positionnement robuste en utilisant les codes et pas les phases.

De plus, la largeur de bande du signal et le taux d'échantillonnage sont plus faibles par rapport à ceux des récepteurs géodésiques (Humphreys *et al.*, 2016). Le taux d'échantillonnage est la discrétisation du signal dans le temps (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008).

Enfin, il existe un mécanisme appelé le *Duty Cycle*. Il s'agit d'une interruption dans la prise de données permettant à l'appareil d'économiser de la batterie (Banville et van Diggelen, 2019). Cela rend les calculs de positionnement avec les phases impossibles, car les mesures de phases sont discontinues (Riley *et al.*, 2018).

Deuxièmement, l'antenne des smartphones est une des sources du manque d'exactitude et de précision (Banville et van Diggelen, 2019). Cela est dû aux caractéristiques de ces antennes. En effet, les antennes des smartphones sont physiquement plus petites que les antennes de type géodésique. Selon les lois de la physique, les antennes de plus grandes tailles possèdent de meilleures caractéristiques, comme une meilleure stabilité du centre de phase, permettant d'obtenir un positionnement centimétrique (Pesyna *et al.*, 2014).

Par ailleurs, les antennes des smartphones ont une perte relative de *gain* de 11 dB par rapport aux antennes géodésiques (Pesyna *et al.*, 2014). Le *gain pattern* des antennes des smartphones est irrégulier. Suivre les signaux GNSS est par conséquent plus difficile (Humphreys *et al.*, 2016). De plus, il a été montré par Caizzone *et al.* (2018), qu'un *gain pattern* régulier permet d'obtenir des observables plus précises.

Enfin, elles possèdent une polarisation linéaire. Cela les rend vulnérables au multitrajet (Pesyna *et al.*, 2014).

Afin d'évaluer la qualité des antennes présentes dans les smartphones, une expérience a été réalisée. Le principe est de collecter des données avec l'antenne et d'ensuite les traiter dans un récepteur externe. Cela permet d'isoler les performances de l'antenne, car les résultats ne sont pas affectés par les limitations du récepteur et de l'horloge du smartphone.

Les résultats de cette expérience ont montré qu'il est possible d'obtenir une exactitude centimétrique avec les antennes des smartphones (Pesyna *et al.*, 2014).

L'influence de l'antenne et du récepteur sur les performances dépend du smartphone considéré. En effet, les technologies se développent et les smartphones plus récents (Samsung S8 et XIAOMI MI8) permettent un positionnement plus précis et plus exact comparé aux plus anciens smartphones (Gogoi *et al.*, 2019).

Positionnement interne

L'étude de la qualité du positionnement des smartphones a débuté par l'évaluation des positions internes. En effet, les données brutes n'ont été disponibles qu'à partir de 2016. Les positions dites internes correspondent à celles calculées de manière autonome par le récepteur du smartphone. Les techniques et les modèles utilisés afin d'obtenir ces positions ne sont pas connus.

Ces positions calculées par le smartphone se basent sur les données de la puce GNSS, mais également sur d'autres capteurs comme le magnétomètre et le système de navigation inertiel (INS). Chaque système d'exploitation utilise d'une manière différente les données recueillies grâce aux capteurs (Dabove *et al.*, 2017).

Pour évaluer les performances du récepteur du smartphone, la qualité des positions est analysée. La précision des observables ne pouvait pas être étudiée lorsque les données brutes n'étaient pas disponibles. En effet, seule la position calculée était accessible (Robustelli *et al.*, 2019).

L'exactitude des positions calculées par la puce GNSS du smartphone est de 2 ou 3 mètres lorsque les conditions sont favorables. Elle peut atteindre 20 mètres dans les situations où il y a beaucoup de multitrajet ou lorsque la visibilité est mauvaise, comme dans les canyons urbains (Dabove et Di Pietra, 2018 ; Zhang *et al.*, 2018).

Afin de démontrer les performances du positionnement par le récepteur d'un smartphone et de ses capteurs internes, les chercheurs ont placé un smartphone à l'extérieur dans différents environnements. Dans l'espace ouvert, l'exactitude varie, selon les composantes North, East ou Up, d'un demi-mètre à 2 mètres. La précision vaut entre 2 et 4 mètres. Dans le canyon urbain, l'exactitude atteint jusqu'à 7 mètres et la précision vaut 5 mètres (Dabove *et al.*, 2017).

Données brutes monofréquence

Depuis mai 2016, la société Google a permis d'accéder aux données brutes de la puce GNSS des smartphones possédant au moins Android Nougat (7.0). Ces données brutes comprennent : les *pseudoranges*, les *pseudorange rates*, les messages de navigation, les *accumulated delta ranges* et les informations concernant les horloges (GSA, 2018). L'*accumulated delta range* représente les mesures de phase ambiguës. Il permet de suivre le nombre de cycles qui s'écoulent, mais il n'estime pas la distance entre le récepteur et le satellite.

Depuis la version Pie d'Android (9.0), il existe également une option pour bloquer le mécanisme de *duty cycle* (Gogoi *et al.*, 2019).

L'accès à ces données brutes permet d'une part d'évaluer la précision des observables et, d'autre part, d'obtenir des positions calculées plus précises et plus exactes. En effet, cela permet d'appliquer des traitements de données plus adaptés (Gogoi *et al.*, 2018).

Tout d'abord, en ce qui concerne la précision des observables, une première expérience a été faite en plaçant l'Huawei P10, l'Huawei P10 Plus et la tablette HTC Nexus 9 dans une chambre anéchoïque. Il s'agit d'une pièce où les fréquences radio sont complètement absorbées. Cela permet de simuler un milieu de propagation parfait. Les résultats de ce test montrent que le *Carrier to Noise* a une valeur située entre 46 et 50 dB, avec un écart type entre 0,08 et 0,014 dB en fonction de l'appareil Android considéré. Le bruit des codes varie entre trois et six mètres. La précision des phases est d'une dizaine de millimètres (Gogoi *et al.*, 2019).

D'autres chercheurs ont mené une expérience pour évaluer ces précisions dans un milieu ouvert. Ils ont réalisé des doubles différences entre deux Samsung S7 sur les codes en courte ligne de base. Ils ont pu en déduire que la précision de l'observable des codes est de 14 mètres dans le cadre de leurs observations. Les codes sont une trentaine de fois plus bruités par rapport à une expérience identique réalisée entre deux appareils géodésiques (Riley *et al.*, 2018).

Ils ont également réalisé des doubles différences de phase sur courte ligne de base avec la tablette Nexus 9 qui n'effectue pas le mécanisme de *duty cycle*. La précision de l'observable de phase est de 170 millicycles avec les données de l'expérience. Elle est donc centimétrique. Cette valeur est un ordre de grandeur supérieur à celle obtenue avec des appareils précis (Riley *et al.*, 2018).

Une autre recherche a montré que la qualité des observations est dépendante du *Carrier to Noise*. Elle n'est pas corrélée à l'élévation, contrairement aux récepteurs géodésiques (Zhang *et al.*, 2018). Ce rapport peut être jusqu'à 10 dB plus faibles pour les smartphones comparés aux récepteurs géodésiques (Riley *et al.*, 2018 ; Zhang *et al.*, 2018).

Ensuite, en ce qui concerne la précision et l'exactitude du positionnement à partir des données brutes, Gogoi *et al.* (2019) ont calculé un positionnement en SPP pour les appareils se trouvant dans la chambre anéchoïque. Les précisions sont submétriques. En appliquant des modèles de correction atmosphériques, les exactitudes en NEU sont respectivement 3, 1 et 6 mètres. Afin d'estimer la qualité du positionnement dans un milieu non contrôlé, Zhang *et al.* (2018) ont calculé la position de la tablette Nexus 9 en utilisant le SPP dans un scénario statique. L'exactitude de ces résultats est plurimétrique.

Dabove et Di Pietra (2018) ont montré qu'il est possible d'atteindre une précision centimétrique en pratiquant du positionnement relatif en temps réel, en utilisant les mesures de phases dans un espace ouvert avec un Samsung Galaxy S8+ et un Huawei P10 Plus. L'exactitude est métrique.

Données brutes bifréquence

L'apparition de smartphones capables d'exploiter deux fréquences est récente. Le premier smartphone disposant d'une puce GNSS bifréquence est le Xiaomi Mi8 (Robustelli *et al.*, 2019).

D'un point de vue théorique, cette nouvelle fréquence permet d'augmenter le nombre de signaux GNSS reçu. Cela permet également de diminuer le temps nécessaire pour résoudre les ambiguïtés (Pesyna *et al.*, 2014) et d'éliminer les erreurs dues à la présence de l'ionosphère (Robustelli *et al.*, 2019).

L'analyse de la qualité des observables, du positionnement interne et du positionnement avec les données brutes a été entamée.

Tout d'abord, avant l'intégration des puces GNSS bifréquence dans les smartphones, une expérience connectant un récepteur bifréquence (Broadcom BCM47755) à une antenne d'un Samsung S7 a été réalisée. L'écart type calculé sur des doubles différences de phase en *zero-baseline* est de 9 millimètres. Cela a permis de montrer qu'il était possible d'atteindre une précision centimétrique sur le positionnement (Riley *et al.*, 2018).

Ensuite, lors de la mise sur le marché du Xiaomi Mi 8, une première série d'expériences a été menée afin d'évaluer les performances du calcul interne du smartphone. Elle montre que, dans un scénario statique, les résultats obtenus par ce smartphone sont plus exacts de 5 mètres en North et de 7 mètres en Up, que ceux obtenus pour le Samsung S8. Dans un scénario cinématique, le comportement des deux smartphones est différent selon les environnements. Cela peut être attribué au fait que les récepteurs des smartphones exploitent de manière différente les capteurs (NSL's Flamingo Team, 2018).

Enfin, Robustelli *et al.* (2019) ont réalisé plusieurs expériences pour évaluer les performances du Xiaomi Mi 8.

Premièrement, ils ont observé que le *Carrier to Noise* est plus faible pour les mesures du smartphone comparées à celles d'un récepteur géodésique. La qualité des observations du Xiaomi Mi8 est donc plus faible.

Deuxièmement, ils ont analysé le multitrajet. Le multitrajet du récepteur géodésique est dix fois plus faible que celui des smartphones. De plus, le multitrajet sur les fréquences L5 et E5a est plus faible que celui sur les fréquences L1 et E1. De plus, les mesures faites avec le système Galileo contiennent un multitrajet ayant un écart type plus faible de plusieurs mètres par rapport à celles effectuées avec GPS.

Troisièmement, ils ont effectué des calculs de positionnement en monofréquence. Ils ont d'abord réalisé du SPP. Ils ont conclu qu'utiliser une solution multi-GNSS permettait d'améliorer le positionnement. L'exactitude varie de 6 à 20 mètres en fonction de l'exposition au multitrajet. Ils ont également réalisé un calcul de positionnement en relatif, en n'utilisant que les fréquences L1 et E1. L'exactitude est submétrique dans une situation avec peu de multitrajet.

3. Hypothèses de recherche

À la suite de cet état de l'art reprenant les performances des smartphones en termes de qualité des observables et de positionnement, il est possible de poser deux hypothèses qui répondront à la question de recherche précédemment formulée.

La première hypothèse concerne la qualité des données :

« L'utilisation d'un smartphone nouvelle génération et possédant une puce GNSS exploitant les fréquences L5/E5 permet d'obtenir des observables de base, codes et phases, avec une précision significativement meilleure. »

La seconde hypothèse concerne la qualité du positionnement :

« L'accès aux données brutes d'un smartphone nouvelle génération et la possibilité de capter les deux fréquences L1/E1 et L5/E5 permettent d'obtenir un gain significatif dans la précision et l'exactitude des résultats de positionnement lorsque le smartphone est « connecté » à une antenne de type géodésique via une cage de Faraday et lorsque le smartphone est déposé dans un environnement disposant d'un horizon dégagé ou partiellement dégagé. »

Par « connecté », il est sous-entendu que les données récoltées par l'antenne de type géodésique sont réémises dans la cage de Faraday. Les données captées par le récepteur du smartphone sont donc celles provenant de cette antenne géodésique.

L'horizon dégagé représente un environnement où peu, voire pas, d'obstacles peuvent gêner la visibilité des satellites. Il peut s'agir d'un toit.

L'horizon partiellement dégagé représente un environnement où plusieurs obstacles peuvent gêner la visibilité des satellites, comme des arbres ou une maison.

La précision du positionnement attendue est centimétrique et l'exactitude est submétrique, voire centimétrique. Étant donné que la position de l'antenne dans les smartphones n'est pas connue avec précision, il n'est pas utile d'obtenir une exactitude inférieure à la taille du smartphone (Dabove *et al.*, 2018).

4. Environnement de travail

Dans le contexte de ce mémoire, différents choix ont été posés afin de mener à bien les recherches. Ces derniers concernent les appareils utilisés pour récolter les données et le logiciel utilisé pour calculer les positions. Une description de ces éléments ainsi que des justifications sont fournies. Cette partie explique également les choix concernant les options insérées dans le logiciel.

4.1 Appareil de récolte de données

Smartphones

Dans le cadre de cette recherche, il est nécessaire d'utiliser un smartphone possédant une puce GNSS bifréquence. Il a été décidé d'employer le Xiaomi Mi 8 (Xiaomi, 2018). L'unité de géomatique dispose de deux Xiaomi Mi 8.

Dans la suite du mémoire, lorsqu'une expérience exploite un seul de ces smartphones, il sera dénoté XIM8. Si l'expérience implique les deux Xiaomi Mi 8, ils sont alors notés XIMA et XIMB afin de les distinguer.

Ce smartphone possède une puce Broadcom BCM47755 (Robustelli *et al.*, 2019). Cette dernière permet des calculs multi-fréquence et multi-GNSS. En effet, elle est capable d'exploiter les fréquences L1-L5 de GPS, E1-E5a de Galileo, L1 de GLONASS, B1 de BeiDou et L1-L5 de QZSS. Au niveau des calculs internes de positionnement, cette puce combine les mesures GNSS à d'autres capteurs comme le magnétomètre et l'accéléromètre pour fournir des résultats plus précis. De plus, la présence des deux fréquences permet à la puce d'atteindre une meilleure exactitude dans les environnements contraignants comme les zones urbaines. Elle utilise également cette caractéristique pour diminuer l'effet du multitrajet (Broadcom, 2017).

Les données utilisées pour les recherches sont les positions internes calculées par le récepteur du smartphone et les données brutes sous format RINEX pour évaluer la précision des observables et le positionnement à partir de ces données. Les positions internes et les données brutes sont disponibles toutes les secondes.

Le format RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*) est un format permettant l'échange et la combinaison de données entre différents récepteurs. La convention utilisée pour décrire à quelle période les données ont été récoltées est de suivre la structure DOYn. DOY est le jour de l'année, de 001 à 365 ou 366. La lettre « n » représente la session, de « a » à « n ». Elle vaut « a » lorsque la session se déroule entre 00h00 et 01h00. Par exemple, la période de récolte 094m a été effectuée le 94^{ème} jour de l'année, soit le 04 avril, à la session m, soit entre 12h00 et 13h00 (IGS, 2007).

D'autres smartphones possédant ces caractéristiques sont commercialisés sur le marché. Il existe, par exemple, le Huawei Mate 20 Pro (Huawei, 2018) et le Xiaomi Mi 9 (Xiaomi, 2019). Des problèmes techniques ont été rencontrés lors de la prise des données empêchant l'exploitation de ces appareils pour l'évaluation de la qualité des données brutes. Cependant, les positions internes calculées par le récepteur de l'Huawei Mate 20 Pro sont utilisées afin d'effectuer des comparaisons avec celles du Xiaomi Mi 8.

Afin d'évaluer l'évolution technologique des smartphones, le Samsung Galaxy S8, qui possède une puce GNSS monofréquence, est utilisé pour effectuer des comparaisons sur le calcul de positionnement interne.

Ce smartphone est équipé de la puce Broadcom 4774. Il s'agit d'une génération de puce antérieure à celle du Xiaomi Mi 8. Elle n'exploite qu'une fréquence, mais elle gère le multi-GNSS (IHS Markit, 2017). Dans ce smartphone, le mécanisme de Duty Cycle est activé. Le positionnement avec les phases est donc impossible.

Dans les expériences, le Samsung S8 est noté SAS8.

Récepteurs géodésiques

Des récepteurs géodésiques sont également utilisés dans le cadre de cette recherche. En effet, ces derniers permettent d'effectuer des comparaisons sur les performances en termes de qualité des observables et du positionnement.

Les récepteurs géodésiques sont ceux appartenant à l'unité de géomatique de l'Université de Liège. Cinq récepteurs géodésiques sont disponibles. De manière plus détaillée, deux récepteurs Trimble NetR9, deux Septentrio PolaRx4 et un Septentrio PolaRx5 sont présents. Ces récepteurs sont reliés à deux antennes situées sur le toit du bâtiment B5a sur le campus du Sart-Tilman. Cette localisation permet de récolter des données dans une situation où l'horizon est dégagé. Ces antennes sont de type *Choke Ring* et sont de la marque Trimble. Elles sont positionnées sur une courte ligne de base de 5,179 mètres. Dans le cadre des expériences, ces antennes sont nommées ULG0 et ULG1.

Afin de rester le plus cohérent possible tout au long des recherches, les récepteurs utilisés sont ceux de la marque Septentrio. Ils sont notés X400 et X501.

4.2 Logiciel RTKLib

Les calculs de positionnement sont tous effectués sur le logiciel RTKLib.

Il s'agit d'un logiciel open-source permettant de calculer des positions avec différentes techniques (SPP, DGNSS, positionnement relatif, PPP...). Il permet de faire du positionnement en temps réel ou en post-traitement (Robustelli *et al.*, 2019).

Le module utilisé est RTKPost. Ce dernier permet de calculer des positions en post-traitement. Deux fichiers doivent être fournis : un fichier RINEX, avec les données récoltées, et les éphémérides du jour concerné, contenant les informations permettant de calculer les coordonnées des satellites. Toutes les techniques de positionnement précédemment citées sont disponibles. Il est possible de régler plusieurs options au sein de ce module. Une première série d'options concerne le calcul en tant que tel. Il est par exemple possible de définir le masque d'élévation, les constellations GNSS utilisées, les modèles atmosphériques à appliquer, la méthode pour résoudre les ambiguïtés lorsque les phases sont utilisées... Un second volet permet de définir un certain nombre de tolérances sur la précision des observables.

Les résultats du traitement sont fournis dans un fichier où les positions sont calculées à chaque pas de temps défini précédemment. Elles peuvent être données en absolu (XYZ) ou en relatif (NEU) (Takasu, 2013).

Le choix de ce logiciel est motivé par les raisons suivantes.

Tout d'abord, il s'agit d'un logiciel open-source. Sa gratuité est un avantage par rapport à d'autres logiciels de traitement GNSS.

Ensuite, son interface est intuitive. De plus, il offre la possibilité d'insérer de nombreuses options.

Enfin, ce logiciel a été utilisé pour mener plusieurs recherches en GNSS. Il a servi pour des expériences sur des récepteurs géodésiques (Takasu et Yasuda, 2009 ; Li *et al.*, 2019) et sur des smartphones (Romero-Andrade *et al.* 2019 ; Robustelli *et al.*, 2019).

4.3 Configuration des tests

Le logiciel RTKLib offre la possibilité de paramétrer de nombreux éléments lors du calcul des positions. Afin de cadrer la recherche, certaines combinaisons de paramètres ont été choisies pour vérifier les hypothèses posées précédemment.

Premièrement, les techniques de positionnement qui seront réalisées sont le SPP, le DGNSS et le positionnement relatif. Ces dernières ont été choisies, car elles reprennent les trois grands types de positionnement en GNSS : le positionnement absolu, différentiel et relatif (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008).

Deuxièmement, pour chaque technique de positionnement, il est possible de définir le masque d'élévation qui doit être appliqué. Ce dernier permet de ne pas prendre en compte les satellites se trouvant en dessous d'un certain degré d'élévation (Takasu, 2013).

Les satellites se trouvant proches de l'horizon traversent géométriquement une distance plus importante dans l'ionosphère et la troposphère. Les erreurs provoquées par ces couches sont donc plus importantes que pour les satellites ayant une plus grande élévation (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008). De plus, l'utilisation de satellites avec une faible élévation augmente l'effet du multitrajet (Sanz Subirana *et al.*, 2013). Par conséquent, il est intéressant d'avoir une valeur assez élevée pour le masque. Au contraire, si la valeur choisie est trop élevée, le nombre de satellites utilisés pour le calcul peut devenir trop faible. De plus, le PDOP, qui détermine la relation entre la précision de la mesure de l'observable et la précision de la position calculée, dépend de la géométrie des satellites. Avec une valeur de masque d'élévation trop élevée, il risque de devenir trop grand. En effet, le masque réduit l'espace dans lequel les satellites peuvent se répartir (Sanz Subirana *et al.*, 2013).

Le masque d'élévation a été défini à 10°, ce qui permet d'obtenir un compromis entre les deux aspects détaillés précédemment.

Troisièmement, il est possible de définir les constellations GNSS que le logiciel doit prendre en compte dans ses calculs.

Tout d'abord, cela peut modifier le PDOP, car ce dernier dépend de la géométrie des satellites (Sanz Subirana *et al.*, 2013). Or, certaines constellations, comme Galileo, possèdent moins de satellites opérationnels. Si une seule constellation est prise en compte, le nombre de satellites visibles est plus petit. La probabilité d'obtenir une bonne géométrie est donc plus faible que lorsque davantage de satellites sont pris en compte. De plus, augmenter le nombre de satellites visibles est important afin d'atteindre une meilleure précision avec les récepteurs des smartphones (Robustelli *et al.*, 2019). Ensuite, certaines constellations possèdent des satellites permettant un positionnement plus précis. Les satellites Galileo émettent des codes et des phases avec des modulations permettant des résultats plus précis (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008).

Pour ces raisons, les constellations GNSS utilisées dans cette recherche sont GPS et Galileo.

Quatrièmement, en ce qui concerne le SPP, il est possible d'appliquer des modèles de correction atmosphérique afin de diminuer les effets liés au passage des signaux dans la troposphère et l'ionosphère. Dans le cadre de ce mémoire, ce sont les modèles de Saastamoinen, pour la troposphère, et de Klobuchar, pour l'ionosphère, qui sont utilisés (Takasu, 2013).

L'apport respectif de chaque modèle est montré dans le Tableau 1. Les valeurs sont obtenues en faisant la moyenne des résultats en SPP sur 24 heures de données obtenues avec les récepteurs géodésiques X400 et X501 aux jours 270 et 276.

Pour le DGNSS et le positionnement relatif, il n'est pas nécessaire d'appliquer des modèles de correction. En effet, les différents tests réalisés dans le cadre de ce mémoire sont effectués sur des courtes lignes de base. Dans ce cas, les erreurs atmosphériques deviennent négligeables en appliquant ces techniques de positionnement (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008).

Tableau 1: Exactitude NEU en fonction du modèle appliqué

DOY	North	East	Up
Pas de modèle			
270	-0,80245	0,24138	-10,82602
276	-0,76608	0,26716	-11,35527
Saastamoinen			
270	-0,97744	0,21292	-1,58153
276	-0,94130	0,27417	-1,99386
Klobuchar			
270	-0,53766	0,16198	-6,67919
276	-0,59470	0,20970	-6,22846

Cinquièmement, le positionnement relatif utilise les phases pour calculer la position du récepteur. Il est par conséquent nécessaire de résoudre l'ambiguïté initiale. Pour ce faire, RTKLib propose différentes techniques (Takasu, 2013):

- *Off*: Cela signifie que lorsqu'il a calculé l'ambiguïté par moindres carrés, le résultat est un nombre réel. Avec cette option, le logiciel n'essaie pas de retrouver la valeur exacte, qui est un nombre entier.
- *Continuous*: Le logiciel laisse la résolution de l'ambiguïté ouverte à chaque époque. Il se sert des valeurs du passé pour résoudre les ambiguïtés futures.
- *Instantaneous*: Le logiciel résout l'ambiguïté à chaque époque. Il doit s'aider des mesures de code afin que le nombre d'inconnues ne dépasse pas le nombre d'équations.
- *Fix and Hold*: Le logiciel attend quelques époques avant de résoudre l'ambiguïté. Lorsque cette dernière est résolue, il ne calcule que les positions et plus l'ambiguïté.

Dans le cadre de la recherche, il a été décidé de résoudre les ambiguïtés en utilisant la méthode *Continuous*. En effet, la méthode *Off* ne permet pas de réaliser les calculs de positions avec l'ambiguïté entière. Les méthodes *Instantaneous* et *Fix and Hold* ne correspondent pas aux caractéristiques des données provenant de smartphones, qui possèdent généralement davantage de sauts de cycles (Humphreys *et al.*, 2016).

Sixièmement, le logiciel RTKLib résout le SPP en n'utilisant que la fréquence L1/E1. Il n'offre pas la possibilité de choisir une autre fréquence. En revanche, pour le DGNSS ou le positionnement relatif, il est possible de travailler en mono ou en multifréquence (Takasu, 2013).

RTKLib, dans sa version standard, ne tire pas complètement avantage du multifréquence dans ses algorithmes. En effet, il l'exploite pour former une combinaison linéaire sur base de deux fréquences permettant d'éliminer l'effet de l'ionosphère. Cependant, le SPP, qui nécessite un modèle de correction ionosphérique, ne peut pas exploiter cette solution, car il n'utilise qu'une fréquence pour le calcul de position (Takasu et Yasuda, 2009).

Dans le logiciel RTKLib, l'apport d'une deuxième fréquence permet donc principalement d'augmenter le nombre d'observables pour les calculs (Takasu, 2013).

Dans le cadre de cette recherche, les deux options, mono et bifréquence, sont utilisées afin de déterminer l'apport de la deuxième fréquence dans le calcul de positions avec le DGNSS ou le positionnement relatif.

5. Méthode

La méthode employée afin de vérifier les hypothèses définies est divisée en trois grandes étapes : évaluation de la qualité des observables, du calcul de position interne des smartphones et du positionnement avec les données brutes. Toutes ces étapes sont répétées dans différents contextes environnementaux. Cela permet d'évaluer les performances de la puce GNSS bifréquence selon les contraintes qui lui sont appliquées.

Les données provenant des récepteurs géodésiques sont toujours soumises au même environnement. Pour cette raison, les qualités des observables et du positionnement ne sont évaluées qu'une fois.

5.1 Définition des environnements

Cage de faraday

Le premier environnement dans lequel les smartphones, XIMA, XIMB et SAS8, sont posés est une cage de Faraday. Cet environnement permet d'évaluer le positionnement interne, la qualité des observables et les positionnements calculés à partir des données brutes lorsque les smartphones captent des données provenant de l'antenne géodésique ULG0.

La cage de Faraday a été fabriquée à partir d'une boîte métallique dans laquelle des couches de plastique et d'aluminium sont alternées afin de créer un blindage électromagnétique empêchant les ondes d'entrer et d'interférer avec le signal reçu (Resnick et Halliday, 1979). Le signal transmis dans la boîte est celui capté par l'antenne ULG0 installée sur le toit du bâtiment B5a. Le signal est ensuite acheminé le long de câbles jusqu'à un *splitter*. Ce dernier a pour but de diviser le signal. Une première partie du signal est envoyée au récepteur Septentrio X400. La deuxième partie est dirigée vers une antenne de réémission libérant le signal dans la cage de Faraday.

En appliquant cette technique, la position, interne ou calculée à partir de données brutes, des smartphones est la position de l'antenne ULG0. Il est par conséquent possible d'effectuer une *zero-baseline* entre le récepteur des smartphones et le récepteur X400 lors de la formation de doubles différences.

De plus, le fait que le signal soit capté par une antenne géodésique et non plus directement par l'antenne du smartphone permet de diminuer les erreurs liées au multitrajet (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008).

Les smartphones utiles à l'expérience sont déposés parallèlement dans cette boîte lors de la récolte des données. Le centre de phase des antennes de smartphones n'est pas modélisé. Cependant, lorsqu'une double différence entre deux smartphones du même modèle et orientés de la même manière est réalisée, l'influence des centres de phase s'annule (Riley *et al.*, 2018).

Toit du bâtiment B5a

Le deuxième environnement est le toit du bâtiment B5a. Placer les smartphones dans cet environnement permet d'évaluer le positionnement interne, la qualité des observables et le positionnement avec les données brutes lorsque l'horizon est dégagé. Il n'y a pas d'obstacle gênant la visibilité des satellites.

Les smartphones sont placés sur une caisse posée sur le sol au centre du toit (Figure 1). Ils sont parallèles entre eux et orientés vers le Nord. Le parallélisme permet d'annuler les erreurs liées au centre de phase de l'antenne (Riley *et al.*, 2018). Imposer l'orientation fait qu'il est possible de connaître les valeurs des composantes NEU de la ligne de base entre smartphones. Elles valent 0 mètre en North, 0,075 mètre en East, soit la largeur d'un Xiaomi Mi8, et 0 mètre en Up (Figure 1).

Afin d'estimer l'exactitude des positions internes ou calculées à partir des données brutes, la position du point où les smartphones sont placés a d'abord été calculée en effectuant des mesures avec le récepteur R10 de la marque Trimble.

Pour ce faire, le récepteur a été positionné sur un trépied au droit de l'endroit où sont posés les smartphones. Des mesures ont été prises durant deux séances de 2 et 4 heures. La position a ensuite été calculée en post-traitement via un service proposé par la société Trimble permettant d'obtenir une exactitude centimétrique (Trimble, n.d.).

Les précisions de ces résultats sont millimétriques et la différence de coordonnées entre les séances est millimétrique en North et en East et centimétrique en Up. Ces résultats sont donc consistants et sont utilisés comme coordonnées de référence pour les tests réalisés sur le toit.

Tableau 2: Précision des positionnements et différences des résultats obtenus

	Précision		
	X (m)	Y (m)	Z (m)
Récepteur	Séance 1		
R10	0,006	0,003	0,007
	Séance 2		
R10	0,005	0,002	0,006
	Différence de positionnement		
	X (m)	Y (m)	Z (m)
	-0,006	-0,004	-0,012

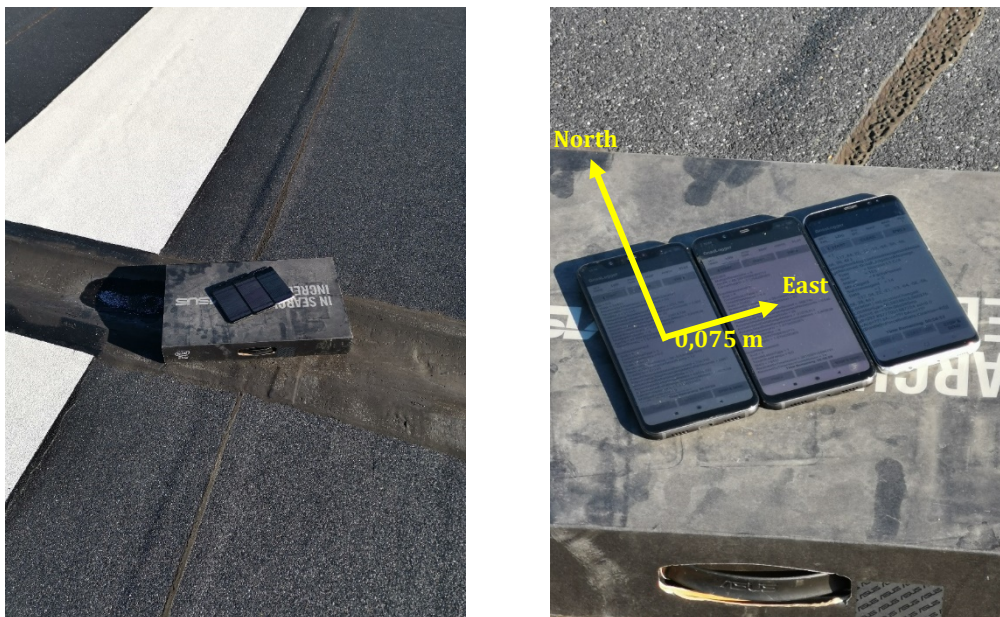


Figure 1: Set-up expérimental sur le toit du B5a ; composantes North et East de la ligne de base

Jardin de Neupré

Le dernier environnement dans lequel les performances sont étudiées est un jardin dans un milieu rural. Il est localisé dans la commune de Neupré, à une dizaine de kilomètres du Sart-Tilman. Cet environnement permet d'évaluer le positionnement interne, la qualité des observables et le positionnement avec les données brutes dans une situation plus proche d'un contexte d'utilisation réaliste. En effet, quelques arbres et une maison gênent la visibilité des satellites. De plus, le multitrajet est davantage présent que dans les autres environnements.

Les smartphones sont placés sur une caisse posée sur le sol dans le jardin (Figure 2). Ils sont parallèles entre eux et orientés vers le Nord. Ce positionnement est justifié de la même manière que celui sur le toit du bâtiment B5a.

La position exacte des smartphones dans le jardin de Neupré n'est pas connue dans le cadre de cette recherche.



Figure 2: Set-up expérimental dans un jardin en milieu rural

5.2 Qualité des observables

La méthode adoptée pour évaluer la qualité des observables dans les différents environnements est d'en déterminer la précision. Cette dernière est obtenue en formant des doubles différences de codes ou de phases provenant des smartphones.

La précision des observables est déterminée pour les fréquences L1-E1 et L5-E5a et pour les constellations GPS et Galileo.

En partant des équations de doubles différences (7) et (8), des hypothèses sont posées :

- Les horloges des récepteurs des Xiaomi Mi 8 sont parfaitement synchronisées. Cela permet de réaliser les doubles différences sur des mesures également parfaitement synchronisées. Les erreurs d'horloge des satellites et des récepteurs s'éliminent alors lors de la formation des doubles différences.
- Les Xiaomi Mi 8 sont placés sur une *zero-baseline* ou sur une courte ligne de base. Les effets de la troposphère et de l'ionosphère sont donc négligeables.
- Le multitrajet des observations formant la double différence est combiné. Étant donné qu'il ne peut pas être éliminé, le multitrajet et le bruit sont indissociables dans les équations.
- La position des récepteurs participant à la double différence est parfaitement connue.

Les coordonnées des satellites pouvant être calculées grâce aux éphémérides, cette dernière hypothèse permet de calculer la valeur du terme $D_A^i(t)$ pour chaque observation participant à la double différence. Il s'agit de la distance géométrique entre le récepteur A et le satellite i au temps t (Équation 9). Par conséquent, le terme $D_{AB}^{ij}(t)$ de la double différence est également parfaitement connu.

$$D_A^i(t) = \sqrt{(X^i - X_A)^2 + (Y^i - Y_A)^2 + (Z^i - Z_A)^2} \quad (9)$$

Sur base de tous ces éléments, il est possible de simplifier les équations (7) et (8) pour obtenir les équations (10) et (11). Il est donc possible d'obtenir la valeur du bruit et du multitrajet combinés des doubles différences de phases et de codes à chaque seconde.

Le résultat des doubles différences de codes au temps t, $DD_p(t)$, est direct (Équation 11). La moyenne des doubles différences au cours du temps doit tourner autour de zéro. La variation autour de cette valeur est la combinaison du bruit et du multitrajet.

Pour les doubles différences de phases, $DD_\phi(t)$, le terme de l'ambiguïté initiale, dont la valeur est un nombre entier de cycles, intervient (Équation 10). Lorsque les doubles différences de phases sont effectuées, la moyenne des résultats doit être proche d'un nombre entier, correspondant à l'ambiguïté. La combinaison bruit et multitrajet est ce qu'il subsiste lorsque cette valeur entière est enlevée.

$$DD_\phi(t) = \frac{\Phi_{AB}^{ij}(t) - D_{AB}^{ij}(t)}{\lambda_k} = N_{AB}^{ij} + \frac{M_{AB,\Phi}^{ij}(t) + \varepsilon_{AB,\Phi}^{ij}(t)}{\lambda_k} \quad (10)$$

$$DD_p(t) = P_{AB}^{ij}(t) - D_{AB}^{ij}(t) = M_{AB,p}^{ij}(t) + \varepsilon_{AB,p}^{ij}(t) \quad (11)$$

Le résultat des doubles différences de phases est exprimé en cycles. Celui des doubles différences de codes est exprimé en mètres. Pour passer d'un résultat en cycles à un résultat en mètres, $DD_\phi(t)$, le résultat de la double différence en cycles, $DD_\phi(t)$, est multiplié par la longueur d'onde, λ_k (Équation 12).

$$DD_\Phi(t) = DD_\phi(t) * (\lambda_k) \quad (12)$$

Ensuite, lorsque le résultat des doubles différences de codes ou de phases est obtenu pour chaque seconde, la moyenne \widehat{DD} (Équation 13) et son écart-type σ_{DD} (Équation 14) sont calculés. Cela permet d'obtenir la précision des doubles différences. La précision des doubles différences est donc fonction du bruit et du multitrajet.

$$\widehat{DD}_o = \frac{1}{n} * \sum_{t=0}^n DD_o(t) \quad \text{où } o = P \text{ ou } \Phi \quad (13)$$

$$\sigma_{DD} = \frac{1}{n-1} * \sum_{t=0}^n (DD_o(t) - \widehat{DD}_o)^2 \quad \text{où } o = P \text{ ou } \Phi \quad (14)$$

Enfin, les précisions des codes, σ_p , et des phases, σ_ϕ , sont obtenues en appliquant la loi de la propagation des erreurs (Équation 15).

Une hypothèse est émise : les mesures des observables participants à une double différence, codes ou phases, ont toutes la même précision.

Les variables aléatoires participant au problème sont la double différence de codes ou de phases, DD_p ou DD_ϕ , et les quatre mesures de codes ou de phases participant à cette double différence, o_A^i, o_B^i, o_A^j et o_B^j où o représente soit une mesure de codes ou une mesure de phases.

$$\begin{aligned}
DD_o &= (o_A^i - o_B^i) - (o_A^j - o_B^j) & \text{où } o = P \text{ ou } \Phi \\
\sigma_{DD}^2 &= (1)^2 * \sigma_o^2 + (-1)^2 * \sigma_o^2 + (-1)^2 * \sigma_o^2 + (1)^2 * \sigma_o^2 \\
\sigma_{DD}^2 &= 4\sigma_o^2 \\
\sigma_{DD} &= 2\sigma_o
\end{aligned} \tag{15}$$

Les précisions obtenues pour les différentes combinaisons de doubles différences satellites-récepteurs sont moyennées pour obtenir la précision des observables dans l'environnement sur la période d'observation. Les satellites ne dépassant pas 10° d'élévation sur la période d'observation ne sont pas pris en compte. En effet, le bruit et le multitrajet amenés par ces derniers ne sont pas représentatifs.

La qualité des observables est déterminée une fois pour les récepteurs géodésiques dont l'environnement ne varie pas et pour le Xiaomi Mi 8 dans la cage de Faraday, sur le toit et dans le jardin.

5.3 Qualité du positionnement

La qualité du positionnement est évaluée en calculant la précision et l'exactitude des résultats.

Positionnement interne

Afin d'évaluer le calcul de positionnement interne du smartphone dans les différents contextes environnementaux, le fichier contenant les positions calculées en XYZ à chaque seconde, X_t, Y_t et Z_t , est exporté pour chaque période de prise de données.

La moyenne arithmétique du positionnement pour chaque période t , \hat{X}, \hat{Y} et \hat{Z} , est calculée en appliquant la formule (Équation 16).

$$\hat{X} = \frac{1}{n} * \sum_{t=0}^n X_t \quad \hat{Y} = \frac{1}{n} * \sum_{t=0}^n Y_t \quad \hat{Z} = \frac{1}{n} * \sum_{t=0}^n Z_t \tag{16}$$

La précision des positions calculées chaque seconde, σ_X, σ_Y et σ_Z , est évaluée en calculant l'écart-type (Équation 17).

$$\sigma_X = \frac{1}{n-1} * \sum_{t=0}^n (X_t - \hat{X})^2 \quad \sigma_Y = \frac{1}{n-1} * \sum_{t=0}^n (Y_t - \hat{Y})^2 \quad \sigma_Z = \frac{1}{n-1} * \sum_{t=0}^n (Z_t - \hat{Z})^2 \tag{17}$$

L'exactitude du positionnement interne calculé par la puce GNSS, $\Delta X, \Delta Y$ et ΔZ , est obtenue en faisant la différence entre le résultat de la moyenne du positionnement, \hat{X}, \hat{Y} et \hat{Z} , et la position exacte connue, X_{true}, Y_{true} et Z_{true} (Équation 18). Ce résultat n'est obtenu que pour les expériences réalisées dans la cage de Faraday et sur le toit. En effet, la position exacte des smartphones dans le jardin n'est pas connue.

L'exactitude, $\Delta X_t, \Delta Y_t$ et ΔZ_t , est également obtenue pour chaque position calculée à chaque seconde, X_t, Y_t et Z_t (Équation 19).

$$\Delta X = \hat{X} - X_{true} \quad \Delta Y = \hat{Y} - Y_{true} \quad \Delta Z = \hat{Z} - Z_{true} \tag{18}$$

$$\Delta X_t = X_t - X_{true} \quad \Delta Y_t = Y_t - Y_{true} \quad \Delta Z_t = Z_t - Z_{true} \tag{19}$$

Le positionnement interne est évalué pour le Xiaomi Mi 8 et le Samsung S8 dans tous les environnements. Les performances du Huawei Mate 20 Pro sont calculées sur le toit (Tableau 3).

Positionnement avec les données brutes

Les positions sont calculées grâce aux fichiers RINEX créés sur base des données brutes extraites. Ces fichiers sont traités dans le logiciel RTKLib. En modifiant les options, le SPP, le DGNSS et le positionnement relatif sont effectués afin d'obtenir les positions.

a. SPP

Le SPP nécessite un seul récepteur en entrée. Dans le cadre de la recherche, le SPP est réalisé sur les données des récepteurs géodésiques dans leur environnement unique et sur les données du Xiaomi Mi 8 (XIM8) dans les différents scénarios (Tableau 3). L'output de ce calcul est la position à chaque seconde du récepteur en XYZ, X_t , Y_t et Z_t .

Le premier critère de qualité est la précision des positions calculées. Pour ce faire, il est nécessaire de calculer la moyenne des résultats (Équation 16). Ensuite, l'écart type est calculé (Équation 17). Cela permet d'obtenir la précision du positionnement en fonction des composantes XYZ exprimée en mètre.

Le second critère est l'exactitude du résultat. Elle est donnée selon les composantes NEU. Pour ce faire, les exactitudes en XYZ sont calculées (Équation 18). Ensuite, les coordonnées géographiques (λ , φ) sont insérées dans une matrice de rotation (Équation 20). Cela permet de changer de système de coordonnées de référence en multipliant cette matrice par les exactitudes en XYZ (Équation 21).

Les exactitudes individuelles des positions calculées chaque seconde sont obtenues en appliquant la même méthode (Équations 20 et 21). Cependant, les exactitudes en XYZ correspondent à celles estimées avec l'équation (19)

$$R = \begin{pmatrix} -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ -\cos \lambda * \sin \varphi & -\sin \lambda * \sin \varphi & \cos \varphi \\ \cos \lambda * \cos \varphi & \sin \lambda * \cos \varphi & \sin \varphi \end{pmatrix} \quad (20)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta E \\ \Delta N \\ \Delta U \end{pmatrix} = R * \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} \quad (21)$$

b. DGNSS

Deux récepteurs sont nécessaires pour réaliser du DGNSS. Une *base station*, dont la position est connue, permet d'estimer les erreurs affectant le signal. Le *rover* calcule sa position en appliquant les corrections estimées précédemment. Le DGNSS est réalisé une première fois entre récepteurs géodésiques (X400 et X501) et puis entre les Xiaomi Mi 8 (XIMA et XIMB) et entre un récepteur géodésique et un Xiaomi Mi 8 (X400 et XIMB) dans les différents contextes environnementaux (Tableau 3). L'output de ce calcul est la position à chaque seconde du récepteur en XYZ.

Les formules à appliquer afin d'obtenir la précision (Équations 16 et 17) et les exactitudes (Équations 18, 19, 20 et 21) des positions calculées sont similaires à celles employées pour le SPP.

c. Positionnement relatif

Pour calculer la position d'un récepteur en utilisant le positionnement relatif, deux récepteurs sont nécessaires, un *rover* et une *base station*. Les coordonnées de la *base station* sont connues. La combinaison des observations en double différence permet d'obtenir la position du *rover*. Le positionnement relatif est réalisé d'une part entre les récepteurs géodésiques (X400 et X501) et, d'autre part, entre les Xiaomi Mi 8 (XIMA et XIMB) et entre un récepteur géodésique et un Xiaomi Mi 8 (X400 et XIMB) pour chacun des contextes (Tableau 3). Les outputs sont les composantes NEU de la ligne de base entre les deux récepteurs à chaque seconde.

Afin d'estimer la qualité du positionnement, la précision est évaluée. Comme pour les techniques précédentes, la moyenne (Équation 22) et l'écart type (Équation 23) sont calculés.

$$\hat{N} = \frac{1}{n} * \sum_{t=0}^n N_t \quad \hat{E} = \frac{1}{n} * \sum_{t=0}^n E_t \quad \hat{U} = \frac{1}{n} * \sum_{t=0}^n U_t \quad (22)$$

$$\sigma_N = \frac{1}{n-1} * \sum_{t=0}^n (N_t - \hat{N})^2 \quad \sigma_E = \frac{1}{n-1} * \sum_{t=0}^n (E_t - \hat{E})^2 \quad \sigma_U = \frac{1}{n-1} * \sum_{t=0}^n (U_t - \hat{U})^2 \quad (23)$$

Pour obtenir l'exactitude, la ligne de base exacte en NEU est calculée. Il est nécessaire de différencier les scénarios où les lignes de base sont créées.

Tout d'abord, la ligne de base X400-X501 est connue et vaut 5,179 mètres. Les composantes NEU valent respectivement 3,010, 4,215 et -0,021 mètres.

Ensuite, lors des tests dans la cage de Faraday, les lignes de base XIMA-XIMB et X400-XIMB valent zéro pour toutes les composantes. En effet, les Xiaomi Mi 8 sont « connectés » à l'antenne ULG0. Il s'agit d'une *zero-baseline*.

Quant à la ligne de base XIMA-XIMB sur le toit et dans un jardin, elle vaut 0,075 mètre en East, soit la largeur du smartphone. Les autres composantes sont nulles. La valeur de ces composantes est liée à la manière dont les smartphones sont placés sur le terrain (Figure 1).

Enfin, les composantes de la ligne de base X400-XIMB sur le toit sont calculées sur base des coordonnées exactes et connues des deux récepteurs. Les composantes NEU de la ligne de base sont obtenues en changeant de système de coordonnées référence. Pour ce faire, les écarts en XYZ entre la *base station* (BS) et le *rover* (r) sont calculés (Équation 24). Ensuite, les coordonnées géographiques de la *base station* sont introduites dans la matrice de rotation (Équation 20). En multipliant cette matrice par les différences en XYZ, ΔX , ΔY et ΔZ , (Équation 21), la valeur des composantes en NEU de la ligne de base est obtenue. Elle vaut - 7,712 mètres en North, -21,400 mètres en East et -4,542 mètres en Up entre le récepteur X400 connecté à l'antenne ULG0 et XIMB. Les coordonnées exactes des smartphones dans le Jardin de Neupré n'étant pas connues, les valeurs des composantes de la ligne de base X400-XIMB ne sont pas calculées dans ce cas.

Le Tableau 4 reprend les valeurs des lignes de base selon les différents scénarios.

$$\Delta X = X_{BS} - X_r \quad \Delta Y = Y_{BS} - Y_r \quad \Delta Z = Z_{BS} - Z_r \quad (24)$$

En positionnement relatif, différents éléments perturbent les premières périodes des résultats de positionnement.

La perturbation provient, d'une part, de l'application d'un filtre de Kalman utilisé pour le positionnement relatif dans le logiciel RTKLib. Il s'agit d'un mécanisme permettant de pondérer le poids des observations en fonction d'estimations sur les positions (Sanz Subirana *et al.*, 2013). Par exemple, si le positionnement est défini comme statique, le filtre de Kalman permet de donner moins de poids aux observations qui s'éloignent de la position calculée. Ce filtre nécessite plusieurs secondes avant de se paramétrer correctement par rapport aux observations.

D'autre part, la résolution de l'ambiguïté initiale nécessite plusieurs observations pour être réalisée.

Pour ces raisons, le calcul de la précision et de l'exactitude du positionnement ne prend pas en compte les 12 premières minutes de résultats. Cette valeur a été choisie empiriquement, en appliquant le positionnement relatif avec XIMA-XIMB et X400-XIMB sur le toit du B5a et en observant le comportement des résultats. Cela est illustré plus tard dans ce mémoire.

Tableau 3: Résumé des tests de positionnements réalisés

Positionnement interne			
Environnement	Xiaomi Mi 8	Samsung S8	Huawei Mate 20
Cage de Faraday	XIM8	SAS8	
Toit	XIM8	SAS8	HM20
Jardin	XIM8	SAS8	

Positionnement avec données brutes			
Technique	Environnement	Base station	Rover
SPP	Cage de Faraday		XIM8
	Toit		XIM8
	Jardin		XIM8
DGNSS	Cage de Faraday	X400 ; XIMA	XIMB
	Toit	X400 ; XIMA	XIMB
	Jardin	X400 ; XIMA	XIMB
Relatif	Cage de Faraday	X400 ; XIMA	XIMB
	Toit	X400 ; XIMA	XIMB
	Jardin	X400 ; XIMA	XIMB

Tableau 4: Résumé des composantes NEU des lignes de base

Environnement	Base Station	Rover	Ligne de base		
			North (m)	East (m)	Up (m)
Cage de Faraday	X400 (antenne ULG0)	XIM8	0	0	0
Cage de Faraday	XIMA	XIMB	0	0	0
Toit du B5a	X400 (antenne ULG0)	X501 (antenne ULG1)	3,01	4,215	-0,021
Toit du B5a	X400 (antenne ULG0)	XIM8	-7,712	-21,400	-4,542
Toit du B5a	XIMA	XIMB	0	0,075	0
Jardin	XIMA	XIMB	0	0,075	0

6. Résultats

L'objectif de ce chapitre est de fournir les différents résultats obtenus en termes de qualité des observables et des positionnements. Ces résultats sont présentés pour les récepteurs géodésiques, pour les récepteurs des smartphones selon les environnements dans lesquels ils se situent.

Ces résultats sont examinés dans la partie « Discussions ».

6.1 Récepteurs géodésiques

Les récepteurs géodésiques ayant un environnement fixe, la qualité de leurs observables et de leur positionnement n'est évaluée qu'une fois.

Qualité des observables

La qualité des observables des récepteurs géodésiques est calculée pour les fréquences L1-E1 et L5-E5a des constellations GPS et Galileo. Pour ce faire, les données du jour 094m ont été utilisées (Annexe 1). La double différence a été appliquée entre les récepteurs X400 et X501 pour les observables de codes et de phases. Des illustrations de ces doubles différences entre les récepteurs et deux satellites Galiléo sont données à la Figure 3 et la Figure 4.

Afin d'obtenir les précisions des observables, les équations (10) à (15) sont appliquées. Si les hypothèses posées au moment de l'élaboration de ces équations sont vérifiées, alors la moyenne des doubles différences de phases doit être proche d'un nombre entier de cycles. Comme illustré à la Figure 4, la moyenne est un nombre entier, à 0,02 cycle près. La moyenne des doubles différences de codes doit être proche de zéro. L'exemple présenté à la Figure 3 montre que la moyenne vaut 0,03 mètre. Les variations autour des moyennes correspondent à la combinaison du bruit et du multitrajet.

La précision des observables de code est d'une dizaine de centimètres pour les constellations GPS et Galileo et pour les deux fréquences (Tableau 5).

La précision des phases varie de 1 à 2 millimètres également pour les deux constellations et les deux fréquences (Tableau 5).

Cette différence de précision entre les codes et les phases est visible sur les graphes (Figure 3 et Figure 4). L'échelle de ces deux graphes est différente. Elle vaut 0,6 mètre pour les codes et 0,04 cycle, soit 0,01 mètre pour les phases (Équation 12).

Tableau 5: Précisions moyennes des codes et des phases des récepteurs géodésiques pour les constellations GPS et Galileo et pour les fréquences L1/E1 et L5/E5a

Constellation	Codes (m)		Phases (m)	
	L1/E1	L5/E5a	L1/E1	L5/E5a
GPS	0,13281	0,10399	0,00109	0,00087
Galileo	0,15417	0,14872	0,00174	0,00240

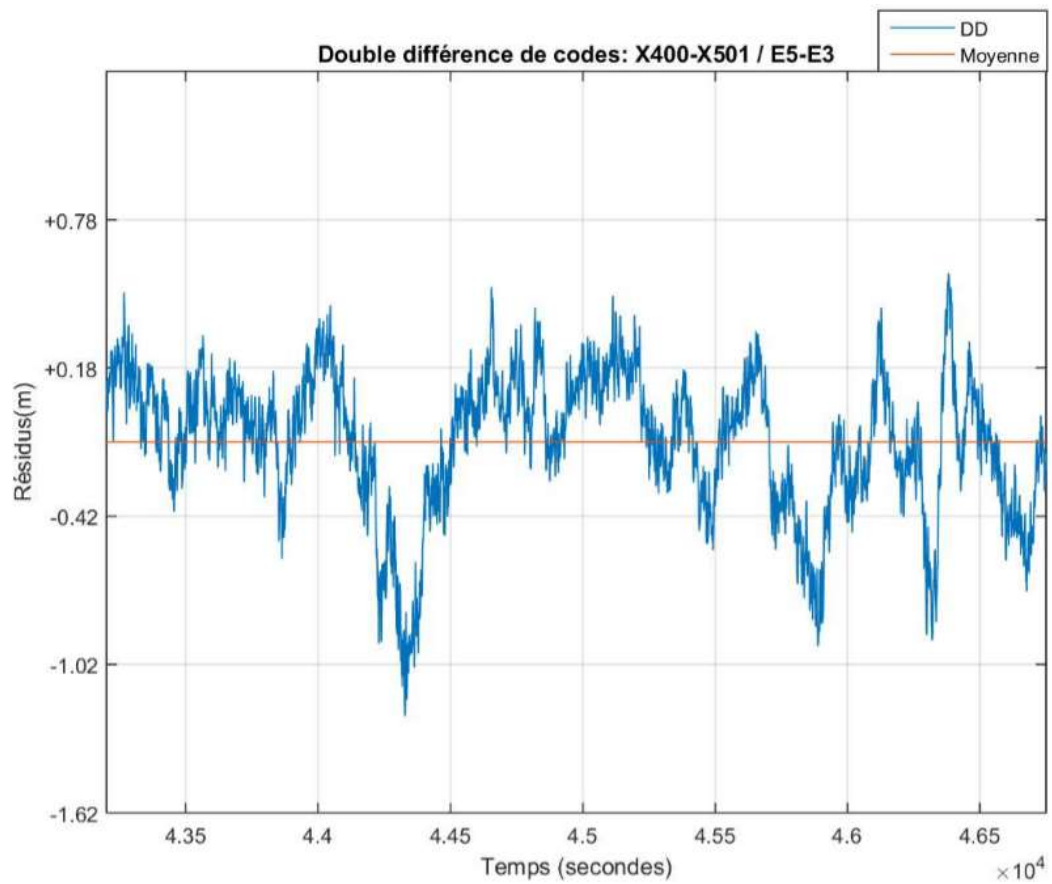


Figure 3: Double différence de codes Galileo (E5a) entre X400 et X501 et les satellites E5 et E3 au DOY 094m (Échelle : 0,60 m)

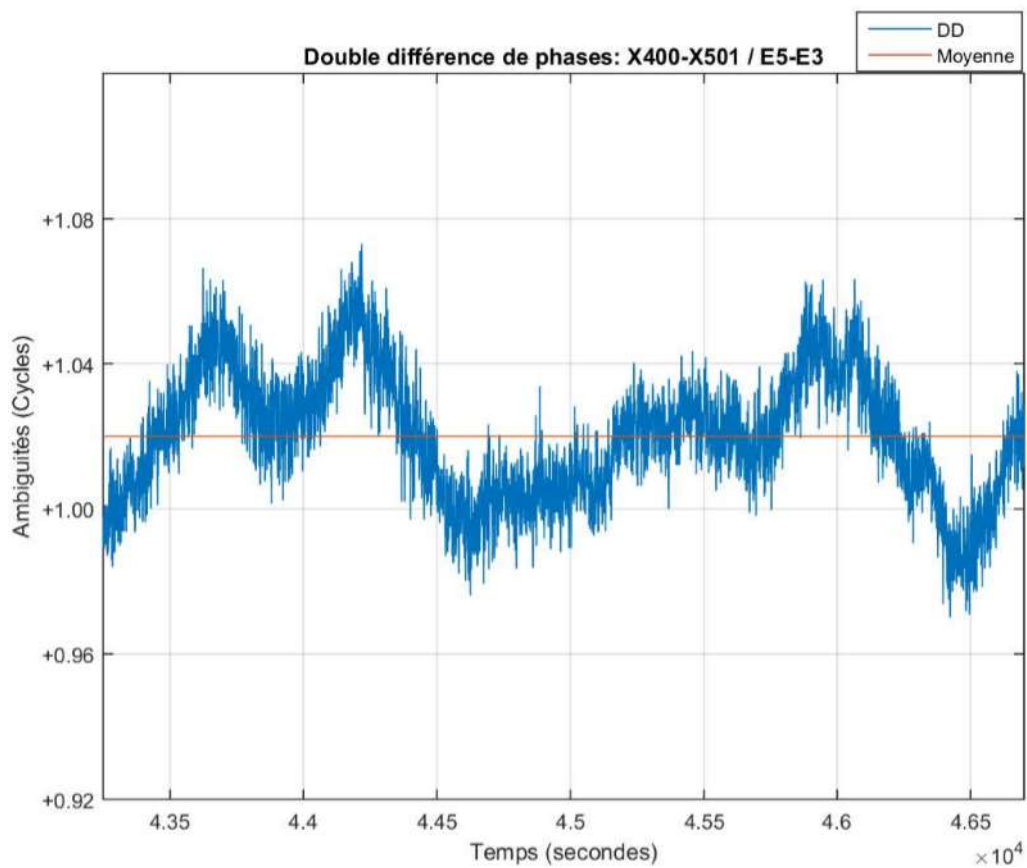


Figure 4: Double différence de phases Galileo (E5a) entre X400 et X501 et les satellites E5 et E3 au DOY 094m (Échelle : 0,04 cycle)

Qualité du positionnement

La précision et l'exactitude moyenne du positionnement des récepteurs géodésiques sont évaluées pour les différentes techniques avec les données des jours de l'année 246k et 246m et 094m (Annexe 1).

a. SPP

La technique de positionnement SPP est appliquée pour les récepteurs géodésiques (X400 et X501).

La Figure 5 illustre le résultat qu'il est possible d'obtenir pour le récepteur X400 au jour 246k. La précision moyenne des résultats obtenus est pluridécimétrique (Tableau 6). La précision en Z vaut 0,82 mètre. Elle est de deux à quatre fois plus grande que celles des autres composantes. La différence de précision entre les composantes est visible sur le graphe (Figure 5).

L'exactitude est pluridécimétrique pour les composantes North et East. Elle est métrique pour la composante Up (Tableau 6). Étant donné la précision des codes, la différence entre les composantes North et East et la composante Up est significative (Tableau 5). La composante Up est celle qui est la plus impactée par les effets de l'ionosphère et de la troposphère. Les modèles de Saastamoinen et de Klobuchar permettent de réduire les effets atmosphériques, mais il subsiste toujours un résidu. De plus, la composante Up est affectée par la géométrie des satellites. En effet, pour avoir un positionnement de bonne qualité en Up, il faut que les satellites soient répartis avec une géométrie adéquate à toutes les élévations (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008). Cela implique de capter des satellites en dessous de l'horizon, ce qui n'est pas possible.

Tableau 6: Précisions et exactitudes moyennes du SPP avec les récepteurs géodésiques pour les jours 246k, 246m et 094m

Rover	Précision			Exactitude		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	North (m)	East (m)	Up (m)
X400/X501	0,43736	0,21145	0,82116	0,41750	0,44456	1,77523

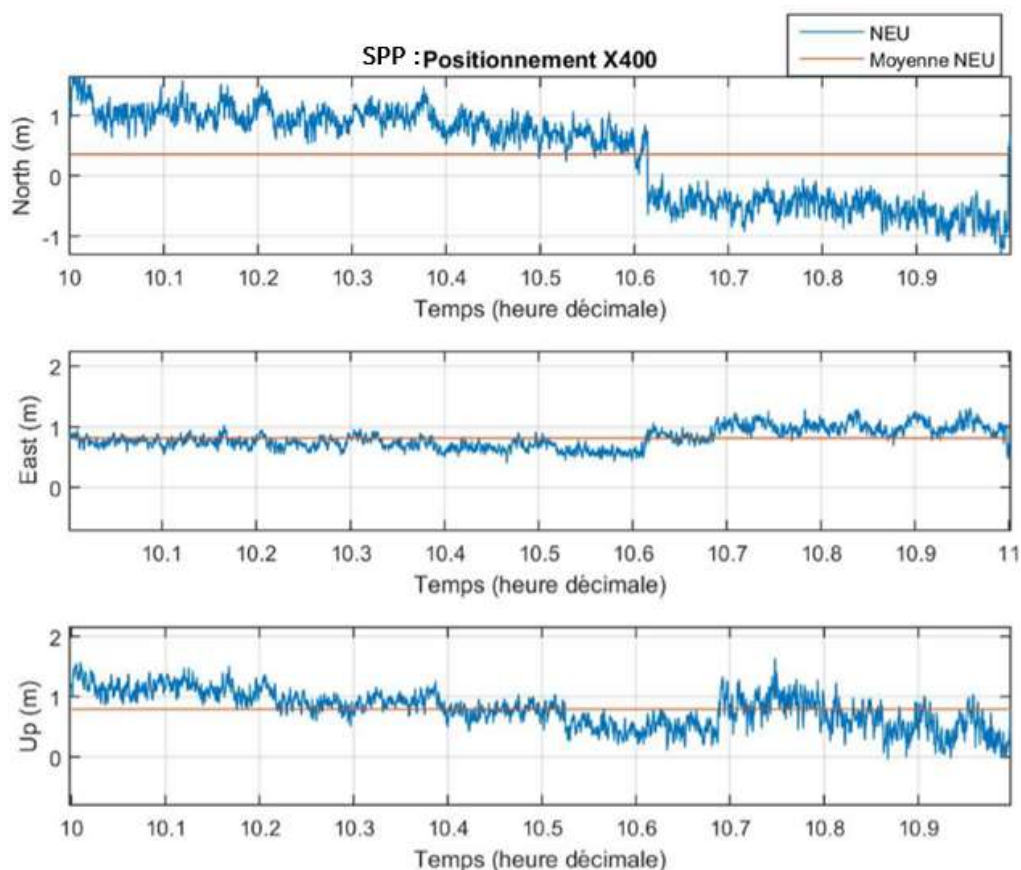


Figure 5: SPP du récepteur X400 avec les constellations GPS et Galileo au jour 246k

b. DGNSS

Le DGNSS est réalisé pour obtenir la position du récepteur géodésique X400. Un deuxième récepteur géodésique, X501, est utilisé pour déterminer les corrections à appliquer. À titre d'illustration, la Figure 6 est le résultat du DGNSS appliqué au X400.

RTKLib offre la possibilité d'effectuer ce positionnement en mono ou multifréquence.

Les précisions moyennes varient entre 10 et 20 cm (Tableau 7). Les écarts types obtenus en multifréquence sont deux fois plus petits par rapport aux résultats obtenus en monofréquence. La différence est de l'ordre de la précision des codes (Tableau 5). Les différences de précision selon les composantes XYZ sont visibles sur le graphe (Figure 6).

Les exactitudes moyennes sont centimétriques. La différence entre les fréquences n'est pas significative par rapport aux précisions des codes (Tableau 7) (Tableau 5).

Tableau 7: Précisions et exactitudes moyennes du DGNSS avec les récepteurs géodésiques pour les jours 246k, 246m et 094m

		Précision			Exactitude		
		X (m)	Y (m)	Z (m)	North (m)	East (m)	Up (m)
Base Station	Rover	L1/E1					
X501	X400	0,21837	0,11295	0,23667	0,05271	-0,02886	-0,09378
		L1+L5/E1+E5					
X501	X400	0,13198	0,06996	0,14684	0,02399	0,00174	-0,09209

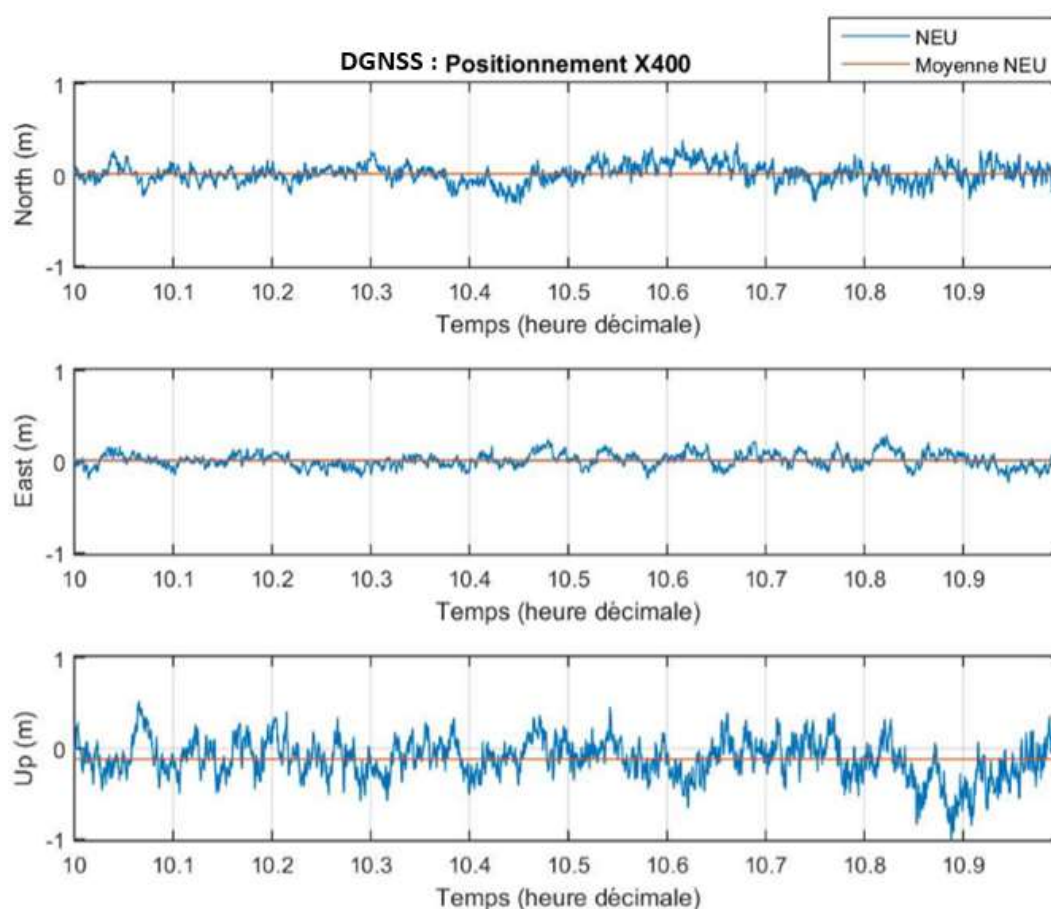


Figure 6: DGNSS (L1-L5/E1-E5) des récepteurs X400-X501 avec les constellations GPS et Galileo au jour 246k

c. Positionnement relatif

Le positionnement relatif en utilisant les observables de deux récepteurs géodésiques, X501 et X400, est réalisé.

La Figure 7 est un exemple typique des résultats obtenus.

Les résultats sont disponibles en mono et en multifréquence.

Le comportement de ce type de positionnement est différent de celui observé en SPP (Figure 5) ou en DGNSS (Figure 6). Cela est notamment dû au filtre de Kalman. Les positions calculées à chaque seconde convergent en moins de quelques secondes (Figure 7).

Les précisions moyennes sont millimétriques, voire submillimétriques (Tableau 8).

Les exactitudes moyennes sont centimétriques ou millimétriques (Tableau 8). Les différences d'exactitude entre les configurations de fréquence ne sont pas significatives. En effet, la précision des phases est millimétrique (Tableau 5).

Tableau 8: Précisions et exactitudes moyennes du positionnement relatif avec les récepteurs géodésiques pour les jours 246k, 246m et 094m

		Précision			Exactitude		
		North (m)	East (m)	Up (m)	North (m)	East (m)	Up (m)
Base Station	Rover	L1/E1					
X501	X400	0,00032	0,00029	0,00061	0,00420	-0,01108	0,02693
		L1+L5/E1+E5					
X501	X400	0,00114	0,00098	0,00162	0,00330	-0,01083	0,02200

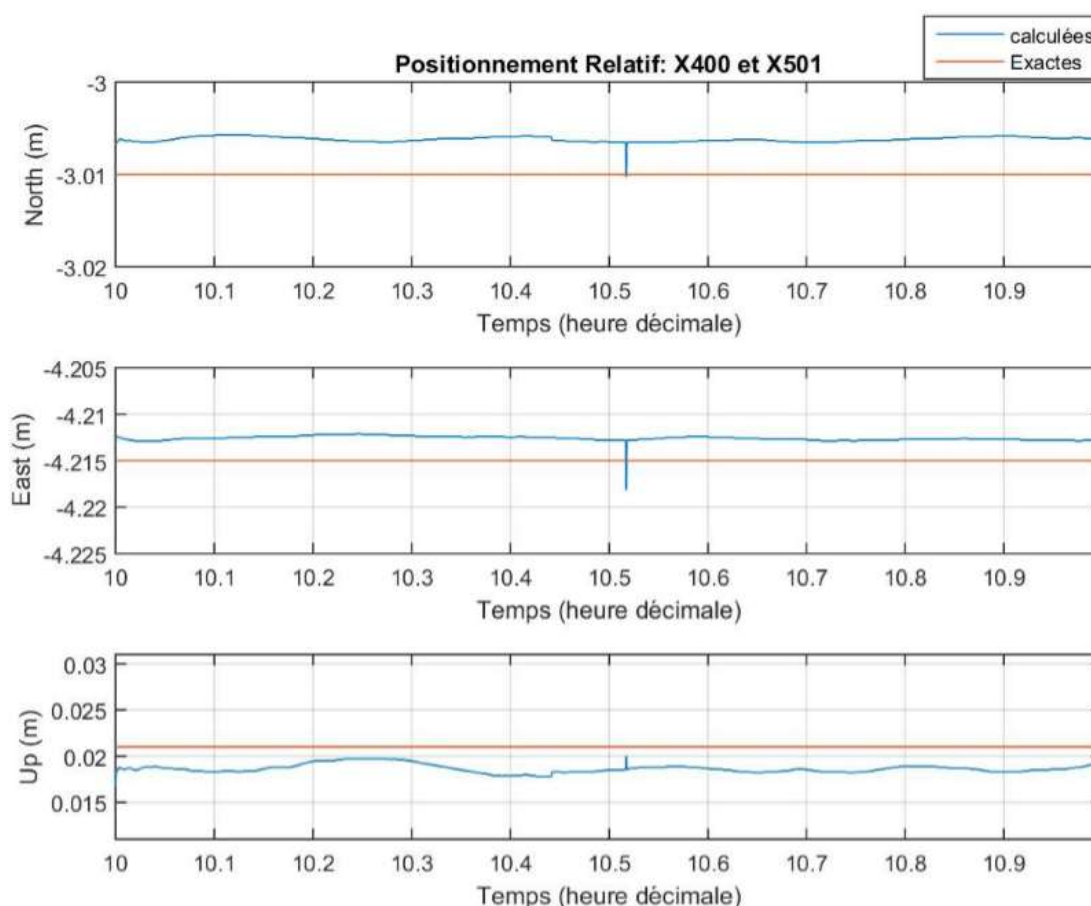


Figure 7: Positionnement relatif (L1-L5/E1-E5) des récepteurs X400-X501 avec les constellations GPS et Galileo au jour 246k

6.2 Cage de Faraday

Les premiers résultats impliquant des smartphones concernent les expériences menées dans la cage de Faraday. Le récepteur du smartphone est indirectement connecté à l'antenne géodésique ULG0 présente sur le toit du bâtiment B5a.

Des récoltes de données ont été effectuées aux jours 091o, 094i, 094m, 095g et 130m avec des durées allant de une à quatre heures (Annexe 1).

Qualité des observables

En réalisant des doubles différences entre Xiaomi Mi 8 (XIMA et XIMB) sur les codes et les phases et en appliquant la théorie de la propagation des erreurs (Équations 10 à 15), les précisions des observables pour les fréquences L1-E1 et L5-E5 des constellations GPS et Galileo sont obtenues.

Si les hypothèses concernant les horloges et les effets atmosphériques sont respectées et si la position des Xiaomi Mi 8 est parfaitement connue, alors la moyenne des doubles différences de codes doit être proche de zéro. Cela est vérifié par les résultats présentés dans l'exemple de la Figure 8.

En respectant les mêmes conditions, la moyenne des doubles différences de phases doit tourner autour d'un nombre entier de cycles. L'exemple de combinaison montré à la Figure 9 permet de vérifier cela.

La précision moyenne des codes dans le contexte environnemental de la cage de Faraday, obtenue sur les différentes combinaisons de satellites-récepteurs est pluridécimétrique (Tableau 9). Ils sont deux fois plus précis lorsque la fréquence E5a de Galileo est utilisée. Le graphe illustre la précision des doubles différences de codes avant l'application de la loi de la propagation des erreurs (Figure 8). Les variations importantes observées au début de la période sont dues aux conditions de l'expérience. En effet, lorsque la récolte de données commence, il est nécessaire de fermer la boîte faisant office de cage de Faraday. Des données ne provenant pas de l'antenne de réémission sont alors enregistrées. De plus, cette antenne n'étant pas fixée, elle peut interférer avec un smartphone, perturbant alors ses mesures.

La précision moyenne des phases vaut entre un demi-centimètre et un centimètre (Tableau 9). L'influence de la constellation et des fréquences est de quelques millimètres. Elle n'est donc pas aussi importante que pour les codes.

Tableau 9: Précisions moyennes des codes et des phases pour les constellations GPS et Galileo et pour les fréquences L1/E1 et L5/E5a dans la cage de Faraday

Constellation	Codes (m)		Phases (m)	
	L1/E1	L5/E5a	L1/E1	L5/E5a
GPS	0,67988	0,42092	0,00728	0,01006
Galileo	0,50659	0,20744	0,00630	0,00916

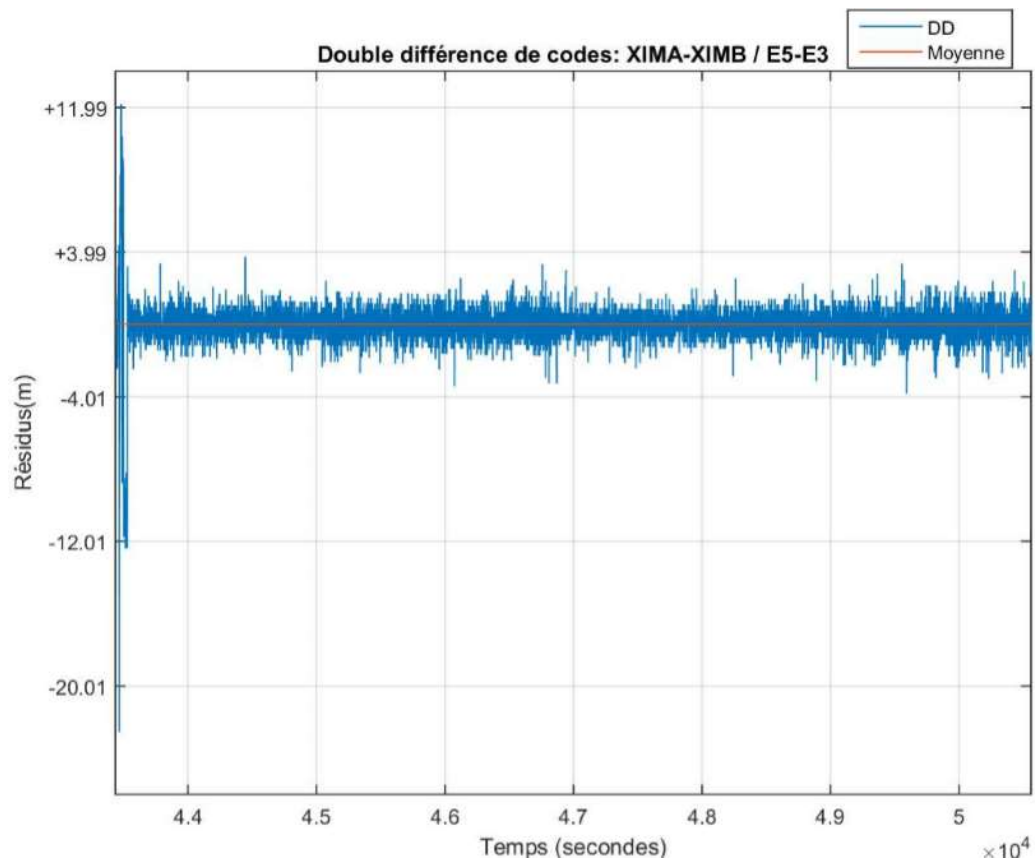


Figure 8: Double différence de codes Galileo (E5a) entre XIMA et XIMB et les satellites E5 et E3 dans la cage de Faraday au DOY 094m (Échelle : 8m)

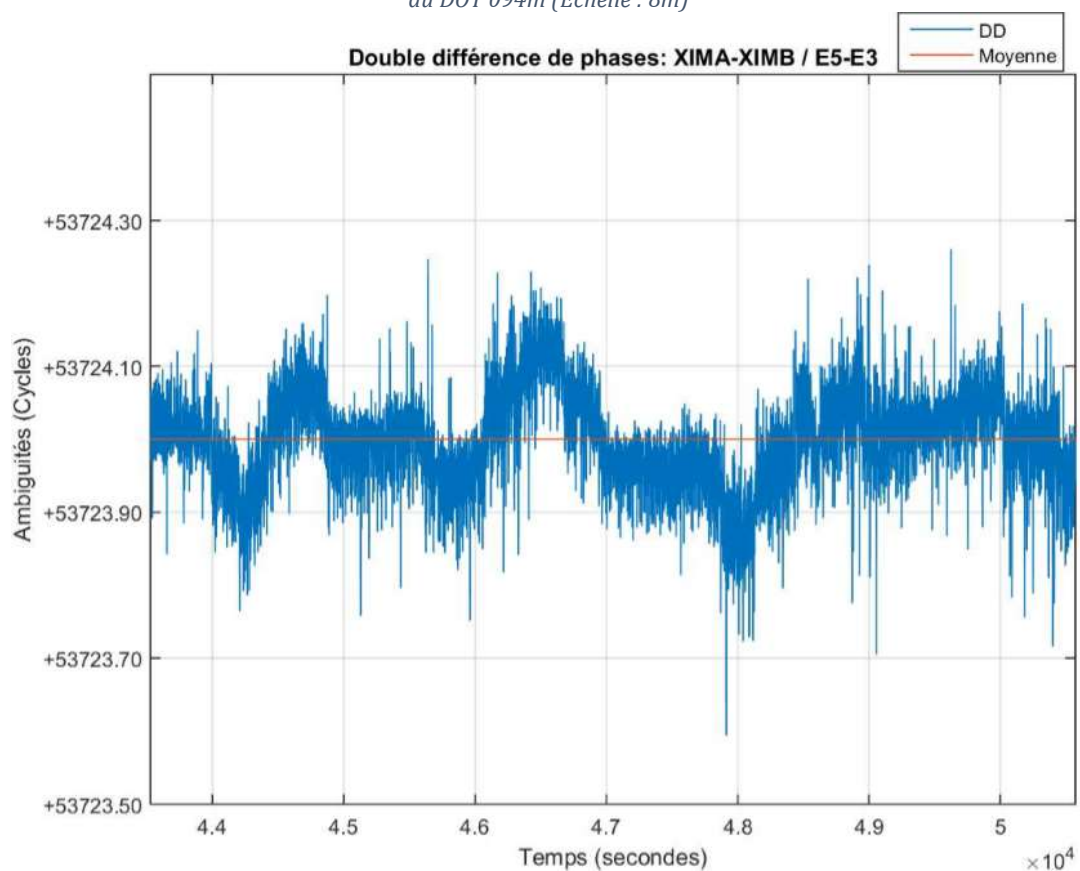


Figure 9: Double différence de phases Galileo (E5a) entre XIMA et XIMB et les satellites E5 et E3 dans la cage de Faraday au DOY 094m (Échelle : 0,2 cycle)

Positionnement interne

La précision et l'exactitude des positions calculées par les smartphones dans la cage de Faraday sont évaluées.

Il est possible de comparer les précisions et les exactitudes obtenues par le Samsung S8 (SAS8) et le Xiaomi Mi 8 (XIM8). Cela est réalisé avec les données récoltées au jour de l'année 130m (Figure 10).

L'écart type du SAS8 est métrique et est deux fois plus petit que celui du XIM8, à l'exception de la composante Y pour laquelle il est trois fois plus grand (Tableau 10). Le comportement des positions calculées par le XIM8 est discuté dans la partie « Discussions » (Figure 10).

Les positions du XIM8 sont plus exactes de plusieurs mètres par rapport à celles du SAS8 pour cette période (Tableau 10). Cependant, la composante Up est deux fois plus exacte lorsque les positions calculées par le SAS8 sont considérées.

En outre, la qualité du positionnement du XIMA est également évaluée pour l'expérience du jour 091o.

À cette période, les précisions et les exactitudes des positions calculées varient de 0,3 à 0,8 mètre (Tableau 10).

La précision et l'exactitude des positions fournies par le XIM8 au jour 130m et par le XIMA au jour 091o diffèrent de plusieurs mètres. Cela peut être lié à différents phénomènes. L'effet principal de cette différence est le fait que lors du jour 091o, sur l'heure de prise de données, seules 600 positions sont calculées au début de la période (Figure 11). Au jour 130, plus de 4000 positions sont calculées.

Tableau 10: Précisions et exactitudes du positionnement interne des smartphones pour les jours 091o et 130m dans la cage de Faraday

	Précision			Exactitude		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	North (m)	East (m)	Up (m)
Smartphone	091o					
XIMA	0,34725	0,27709	0,82755	-0,32538	-0,32399	-0,72350
	130m					
XIM8	2,64213	0,87635	5,62844	4,58269	-0,66271	3,93011
SAS8	1,78698	3,50935	3,15024	-8,13657	-4,08198	1,41296

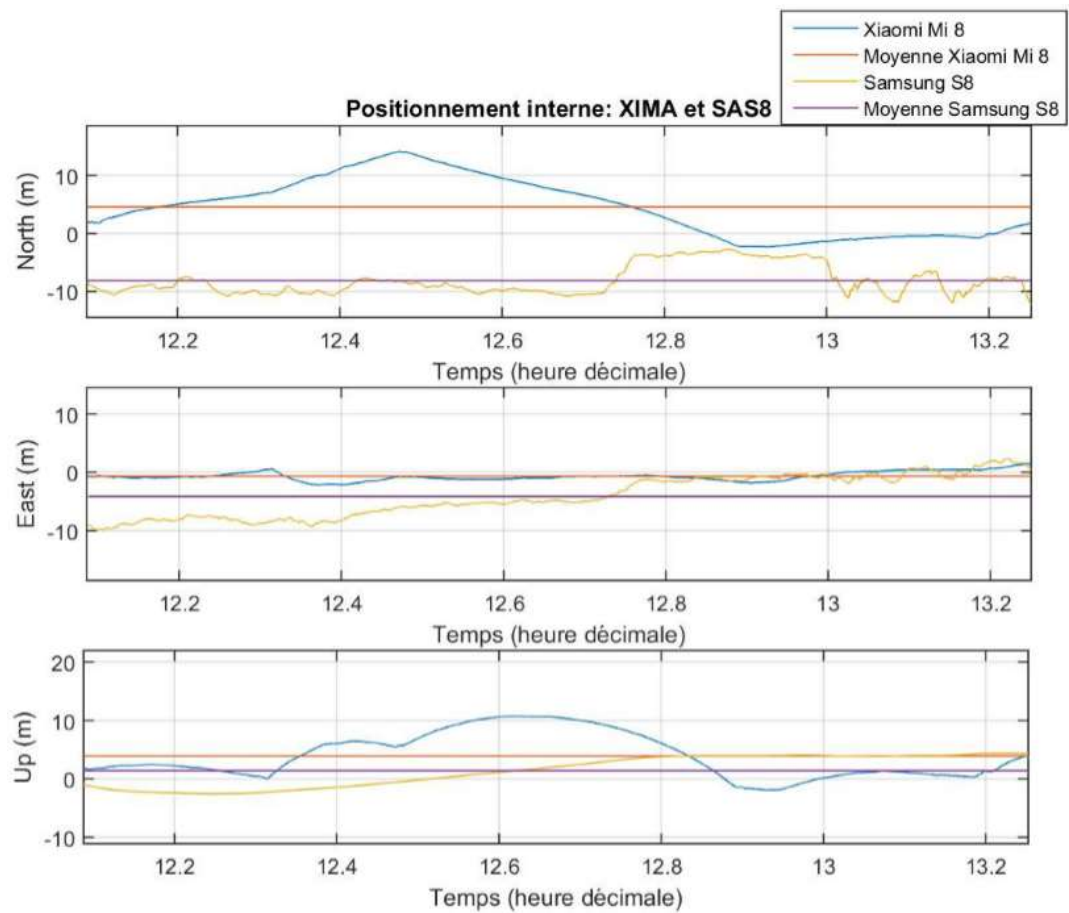


Figure 10: Positionnement interne du XIM8 et du SAS8 au jour 130m dans la cage de Faraday

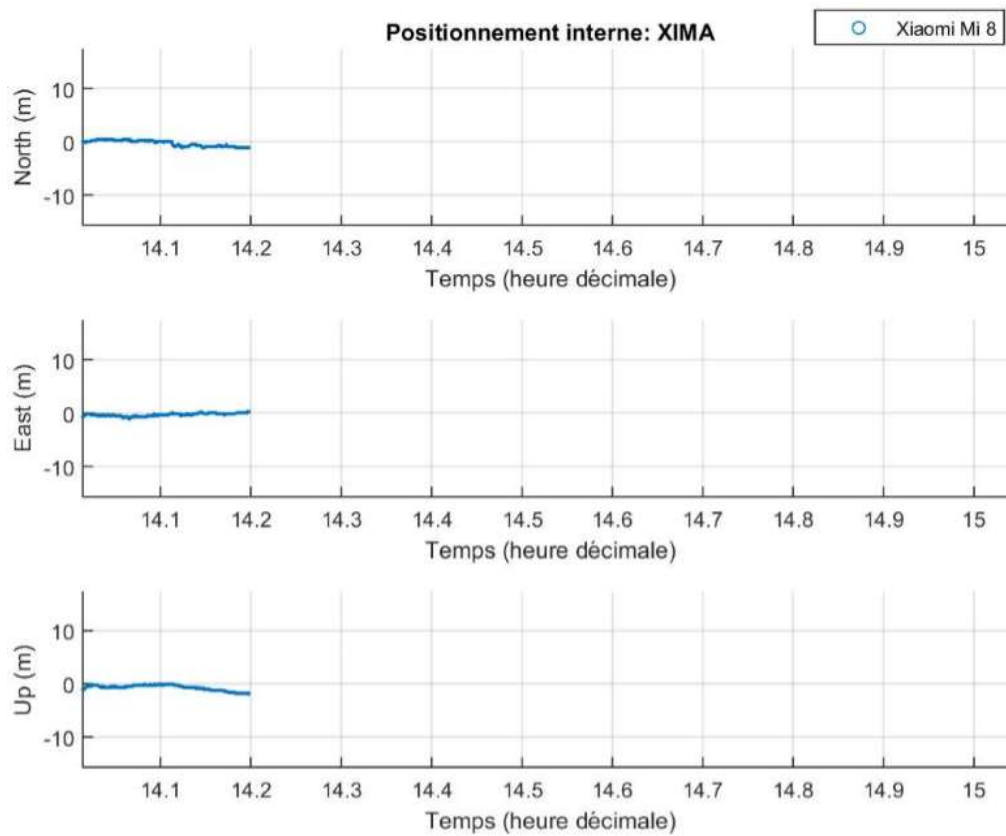


Figure 11: Position interne du XIM 8 au jour 091o dans la cage de Faraday

Positionnement avec les données brutes

a. SPP

Le positionnement en SPP est réalisé pour un Xiaomi Mi 8 (XIM 8) dans la cage de Faraday. Les précisions et exactitudes moyennes des différentes périodes de récolte de données se trouvent dans le Tableau 11.

La Figure 12 est un exemple du comportement type observé lorsque le SPP est appliqué sur les différentes périodes de récolte de données.

La précision moyenne des résultats en SPP dans la cage de Faraday varie entre 1 et 2 mètres selon les composantes XYZ (Tableau 11).

L'exactitude moyenne est de un demi-mètre en North et en East. Elle vaut 3 mètres en Up (Tableau 11).

Le graphe, qui est un exemple du SPP, permet de mettre en avant que la composante Up, étant la plus affectée par les effets de l'ionosphère et de la troposphère, est à la fois la composante la plus bruitée et la moins exacte (Figure 12). Les modèles atmosphériques appliqués ne permettent pas d'éliminer complètement ces effets. L'influence de la géométrie des satellites est également présente, comme dans le cas des récepteurs géodésiques.

Les résultats obtenus en appliquant le SPP à partir des données brutes sont plus précis et plus exacts de plusieurs mètres, sauf pour la composante East, par rapport à ceux fournis par le positionnement interne (Tableau 10). Cela est lié à la manière dont le récepteur du XIM8 calcule sa position en utilisant d'autres capteurs.

Tableau 11: Précisions et exactitudes moyennes du SPP avec les données du Xiaomi Mi 8 pour les jours 094i, 094m et 095g dans la cage de Faraday

Rover	Précision			Exactitude		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	North (m)	East (m)	Up (m)
XIM8	1,57062	1,05534	2,06084	0,51285	0,63103	2,89849

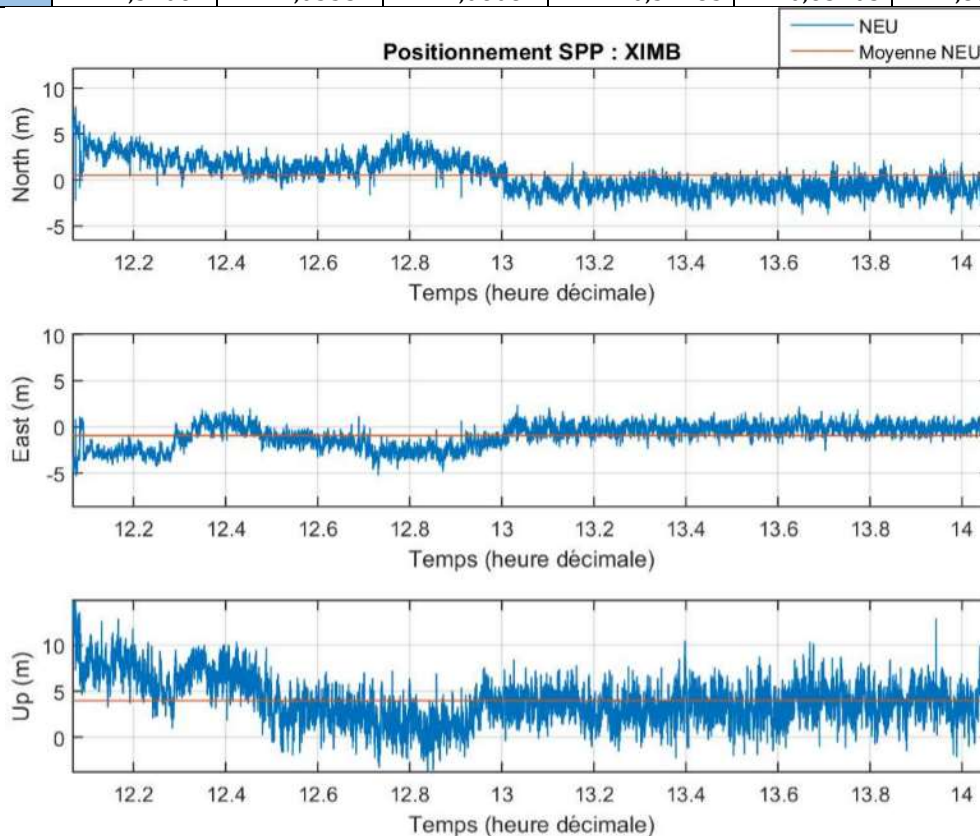


Figure 12: SPP du XIM8 avec les constellations GPS et Galileo au jour 094m dans la cage de Faraday

b. DGNSS

La qualité moyenne du positionnement du Xiaomi Mi 8 (XIMB) avec le DGNSS est évaluée pour les différentes séances de récolte des données (Tableau 12). Les corrections sont apportées par les *base station* qui sont soit un récepteur géodésique (X400) ou un Xiaomi Mi 8 (XIMA) (Tableau 12).

La Figure 13 est un résultat type obtenu en appliquant le DGNSS avec XIMA et XIMB.

Pour le calcul en monofréquence, la précision varie entre un demi-mètre et un mètre et demi. Pour le multifréquence, les valeurs de la précision vont d'un demi-mètre à un mètre (Tableau 12). L'ajout de la deuxième fréquence rend le positionnement plus précis de l'ordre de la précision des codes (Tableau 9).

L'exactitude est centimétrique, voire millimétrique pour les composantes North et East. Elle est décimétrique pour la composante Up (Tableau 12). L'exactitude des résultats en bifréquence n'est pas significativement différente de celle obtenue en monofréquence, à l'exception de la composante Up lorsque la *base station* est un récepteur géodésique.

Le graphe met en avant le fait que la composante Up est la plus bruitée (Figure 13).

La nature de la *base station* n'influence pas de manière significative la précision et l'exactitude du positionnement (Tableau 12).

Les résultats du DGNSS sont en général plus exacts que précis (Tableau 12). Cela est dû au fait que les erreurs liées à la troposphère, à l'ionosphère et aux erreurs d'horloge des satellites sont en grande partie éliminées, permettant d'obtenir une exactitude centimétrique. Au contraire, le bruit et le multitrajet de la *base station* et du *rover* sont combinés, dégradant la précision. Cela est également observé pour le DGNSS entre X400 et X501 (Tableau 7).

Tableau 12: Précisions et exactitudes moyennes du DGNSS avec les données du Xiaomi Mi 8 pour les jours 094i, 094m et 095g dans la cage de Faraday

		Précision			Exactitude		
		X (m)	Y (m)	Z (m)	North (m)	East (m)	Up (m)
Base Station	Rover	L1/E1					
X400	XIMB	1,12883	0,64446	1,43116	0,04401	-0,01292	-0,10710
XIMA	XIMB	0,98162	0,56103	1,22571	0,00876	-0,01299	-0,07718
		L1+L5/E1+E5					
X400	XIMB	0,81182	0,47019	1,11827	0,07946	-0,00137	-0,53712
XIMA	XIMB	0,76284	0,43697	1,00237	-0,01584	0,02105	-0,10694

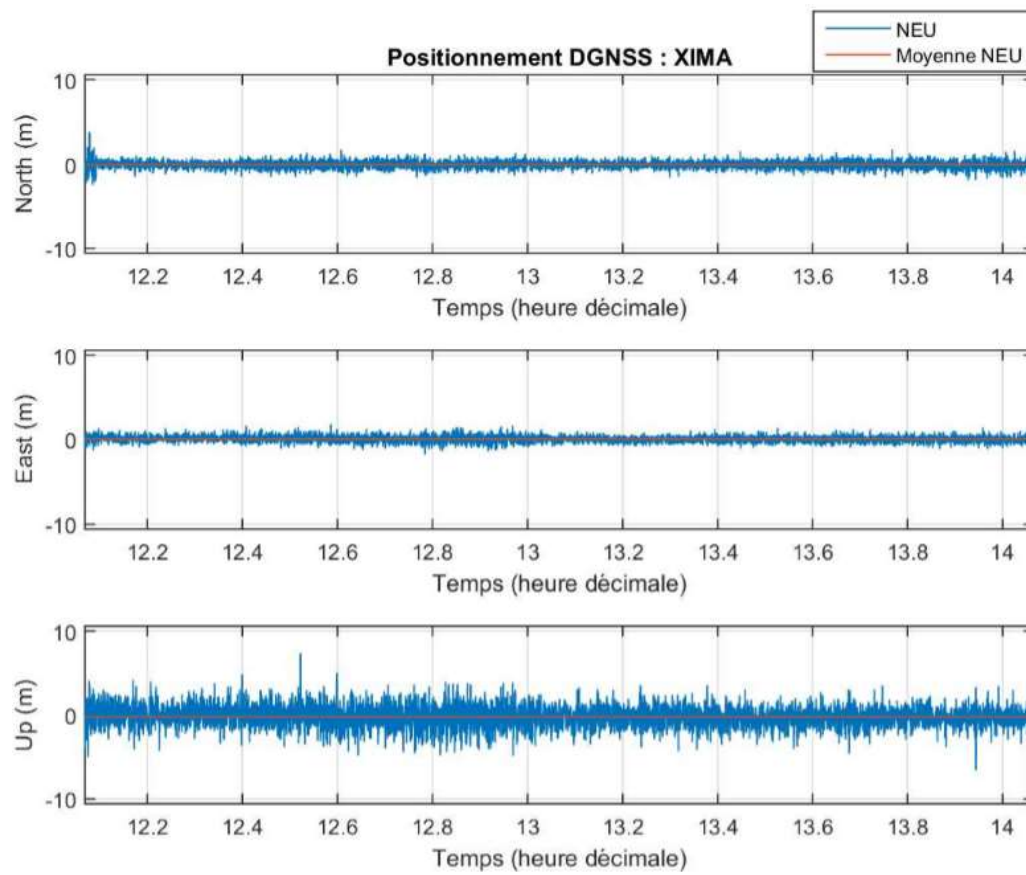


Figure 13: DGNSS (L1-L5/E1-E5) XIMA et XIMB avec les constellations GPS et Galileo au jour 094m dans la cage de Faraday

c. Positionnement Relatif

La détermination des positions des smartphones dans la cage de Faraday, en utilisant le positionnement relatif, a été effectuée. Il est réalisé sur la ligne de base entre deux Xiaomi Mi 8 (XIMA et XIMB) et entre un récepteur géodésique et un Xiaomi Mi 8 (X400 et XIMB). La qualité moyenne du positionnement sur les différentes périodes est évaluée (Tableau 13).

La Figure 14 est un exemple du résultat du positionnement relatif avec XIMA-XIMB. Le temps de convergence des positions est de moins de 5 minutes pour les composantes North et East. Il est plus long de quelques minutes pour la composante Up.

Il est observé que la précision du positionnement relatif de la ligne de base XIMA-XIMB est centimétrique. L'exactitude est millimétrique ou centimétrique (Tableau 13).

De plus, l'écart type des résultats du positionnement sur la ligne de base X400-XIMB est centimétrique. L'exactitude en East est également centimétrique. Elle est décimétrique en North. En Up, elle vaut un demi-mètre (Tableau 13).

Les résultats bifrédence varient de l'ordre de la précision de la phase (Tableau 9). L'apport de la deuxième fréquence n'améliore pas le positionnement.

La différence d'exactitude selon les combinaisons *base station-rover*, X400-XIMB ou XIMA-XIMB, est discutée dans la partie « Discussions ».

Il existe une différence de qualité entre le positionnement relatif avec comme ligne de base X400-X501 et celui avec XIMA-XIMB. En effet, les précisions moyennes de la combinaison X400-X501 sont submillimétriques. L'exactitude moyenne est millimétrique (Tableau 8). La précision et l'exactitude sont centimétriques dans le cas de la combinaison XIMA-XIMB (Tableau 13). Cette différence est liée à la variation de qualité des observables. En effet, les phases ont une précision millimétrique lorsque la combinaison X400-X501 est considérée (Tableau 5). Cette même précision est centimétrique avec la combinaison XIMA-XIMB (Tableau 9).

Afin d'évaluer l'influence du centre de phase du Xiaomi Mi 8 dans la cage de Faraday, un autre set-up expérimental est mis au point. Les deux Xiaomi Mi 8, XIMA et XIMB, sont placés dans la boîte, mais avec une orientation antiparallèle. Cela permet de ne plus éliminer l'influence du centre de phase lorsque le positionnement relatif sur la ligne de base XIMA-XIMB est effectué. Cette expérience est réalisée au jour 127i (Annexe 1).

Les résultats du positionnement relatif avec la ligne de base XIMA-XIMB lorsque XIMA est parallèle à XIMB ou lorsque XIMA est antiparallèle à XIMB sont comparables. Les précisions pour la combinaison XIMA-XIMB antiparallèles sont centimétriques. Les exactitudes sont millimétriques (Tableau 14).

Les précisions du positionnement avec X400-XIMA et X400-XIMB sont équivalentes (Tableau 14). Elles sont centimétriques. La différence en Up est de 0,03 mètre. Les exactitudes varient de quelques centimètres entre les deux combinaisons. Elles sont centimétriques en North et décimétriques en East et en Up.

Ces résultats sont commentés dans la partie « Discussions ».

Tableau 13: Précisions et exactitudes moyennes du positionnement relatif avec les données du Xiaomi Mi 8 pour les jours 094i, 094m dans la cage de Faraday

		Précision			Exactitude		
		North (m)	East (m)	Up (m)	North (m)	East (m)	Up (m)
Base Station	Rover	L1/E1					
X400	XIMB	0,03414	0,02099	0,08766	-0,12209	-0,01500	0,52978
XIMA	XIMB	0,01151	0,01033	0,02405	0,01309	-0,00967	-0,00326
		L1+L5/E1+E5					
X400	XIMB	0,04422	0,02731	0,07488	-0,22189	-0,01157	0,35549
XIMA	XIMB	0,01242	0,02373	0,06443	-0,01886	0,04983	-0,00190

Tableau 14: Précision et exactitude moyennes du positionnement relatif avec les données du Xiaomi Mi 8 pour le jour 127i
- influence des centres de phases des Xiaomi Mi 8

		Précision			Exactitude		
		North (m)	East (m)	Up (m)	North (m)	East (m)	Up (m)
Base Station	Rover	L1/E1					
X400	XIMA	0,01656	0,02760	0,06546	0,00595	-0,32349	0,48715
X400	XIMB	0,01295	0,02571	0,03790	0,03209	-0,28635	0,40326
XIMA	XIMB	0,00461	0,00536	0,02068	-0,00216	0,00390	-0,00770

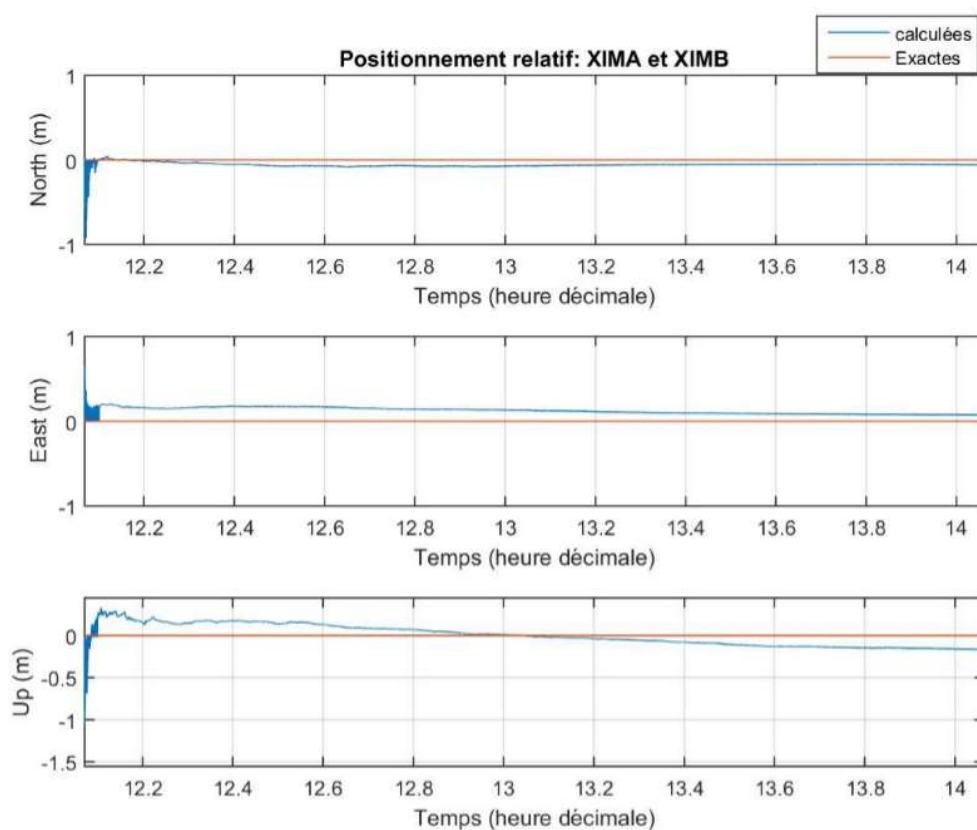


Figure 14: Positionnement relatif (L1-L5/E1-E5) XIMA et XIMB avec les constellations GPS et Galileo au jour 094m dans la cage de Faraday

6.3 Toit du bâtiment B5a

La deuxième série de résultats, impliquant des smartphones, provient des expériences menées sur le toit du bâtiment B5a du campus du Sart-Tilman.

Les données ont été récoltées aux jours de l'année 246k, 246m, 045j, 049n et 091o avec des durées d'une heure (Annexe 1).

Qualité des observables

La qualité moyenne des observables est évaluée en réalisant des doubles différences avec les codes et les phases des Xiaomi Mi 8 (XIMA et XIMB) placés sur le toit du bâtiment B5a.

La Figure 15 illustre un résultat typique des doubles différences de phases dans cet environnement. La valeur moyenne est proche d'un entier. C'est le résultat attendu au vu des hypothèses posées précédemment.

La précision moyenne des codes des différentes combinaisons satellites-récepteurs dans cet environnement est métrique (Tableau 15). La qualité des codes modulés sur la fréquence E5a est deux fois moins bonne que pour les codes modulés sur la fréquence E1. Cela est dû à la présence de nombreux outliers dans les doubles différences. Cette différence entre les fréquences E5a et E1 n'est, par conséquent, pas significative.

La précision moyenne des phases sur le toit du bâtiment B5a est centimétrique pour la constellation GPS. Elle est millimétrique pour celle de Galileo (Tableau 15).

Lors de la formation des doubles différences, des sauts de cycles sont observés (Figure 16). Ces derniers sont dus à la perte du signal d'un satellite par l'antenne de XIMA ou XIMB.

Tableau 15: Précisions moyennes des codes et des phases pour les constellations GPS et Galileo et pour les fréquences L1/E1 et L5/E5a sur le toit du bâtiment B5a

Constellation	Codes (m)		Phases (m)	
	L1/E1	L5/E5a	L1/E1	L5/E5a
GPS	2,70000	1,00000	0,01846	0,01382
Galiléo	2,80000	2,10000	0,00736	0,00847

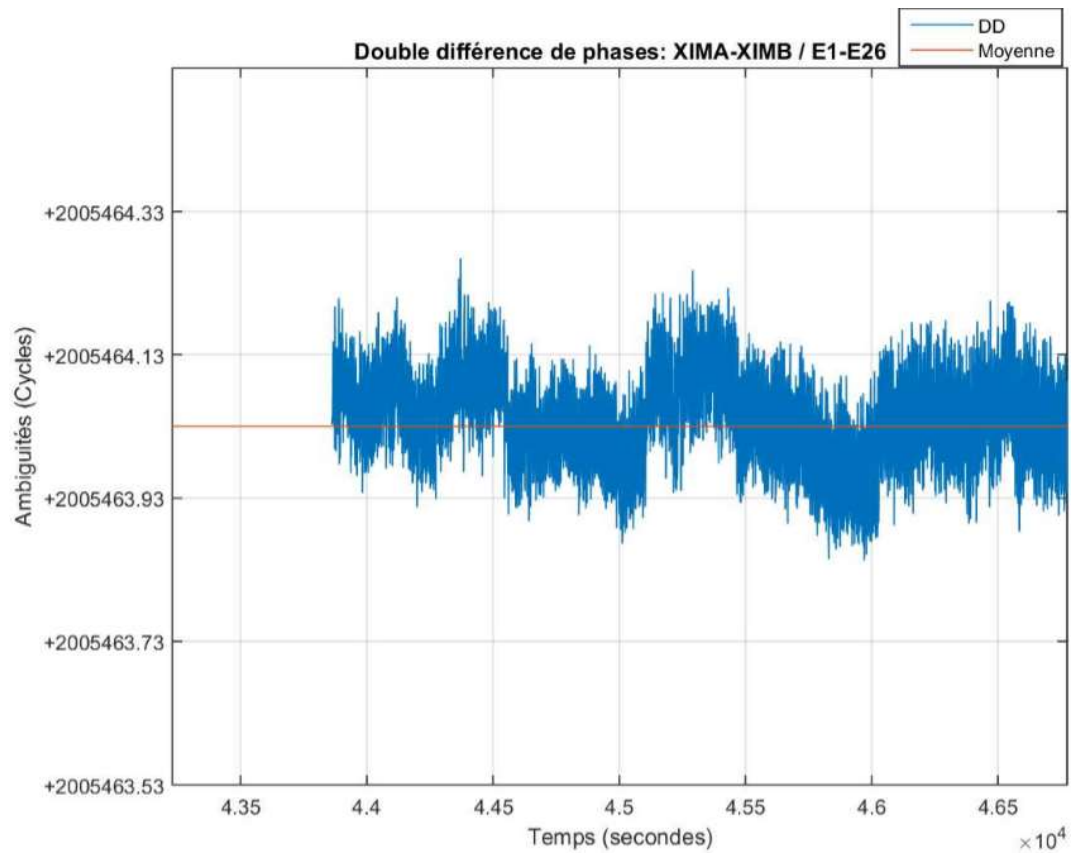


Figure 15: Double différence de phases Galileo (E1) entre XIMA et XIMB et les satellites E1 et E26 sur le toit du bâtiment B5a au DOY 246m (Échelle : 0,2 cycle)

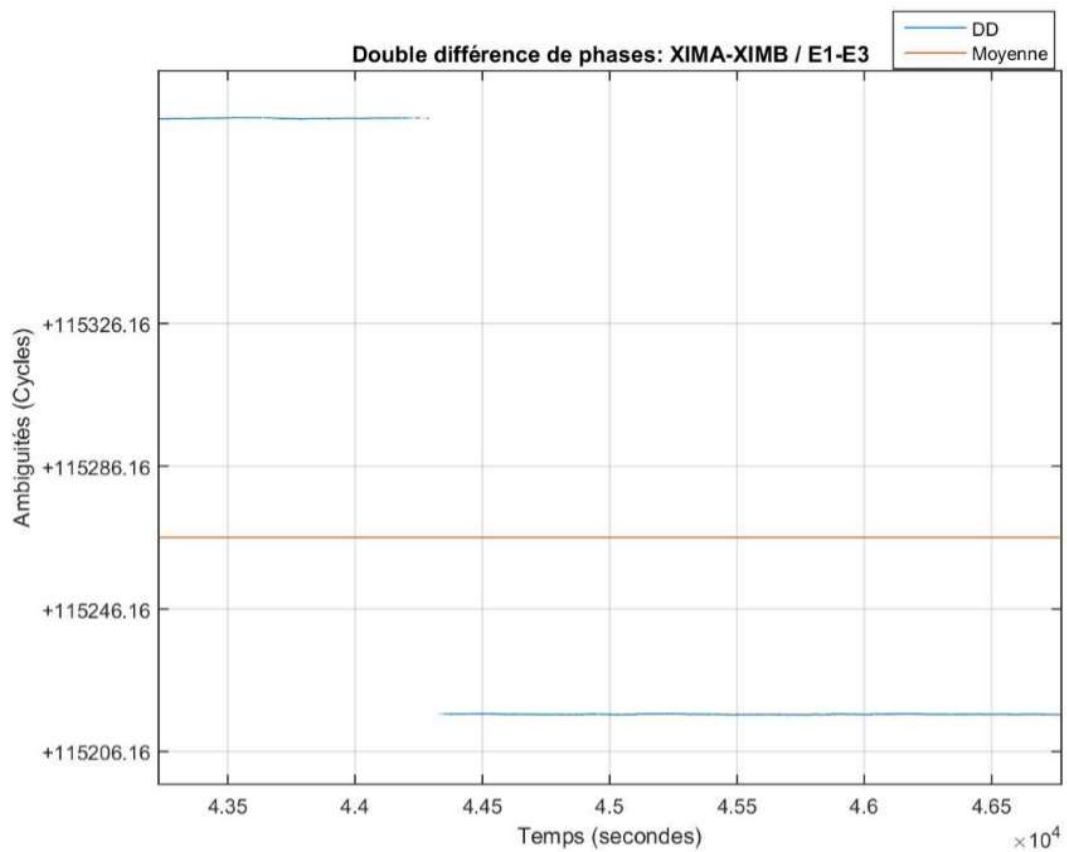


Figure 16: Double différence de phases Galileo (E1) entre XIMA et XIMB et les satellites E1 et E3 sur le toit du bâtiment B5a au DOY 246m (Échelle : 40 cycles)

Positionnement interne

La qualité des positions calculées par les récepteurs des smartphones sur le toit du bâtiment B5a est évaluée.

Les précisions et les exactitudes obtenues par le Xiaomi Mi 8 (XIM8), le Samsung S8 (SAS8) et le Huawei Mate 20 Pro (HM20) sont comparées.

Les résultats des exactitudes du positionnement internes réalisés par XIM8, SAS8 et HM20 sont illustrés à la Figure 17.

Les précisions du XIM8 et du HM20 sont similaires. Elles sont décimétriques. L'écart type du SAS8 est plus de dix fois plus grand. La précision de ce smartphone est de plusieurs mètres (Tableau 16).

Les écarts du positionnement réalisés par le XIM8 avec la position exacte pour les composantes North et East sont deux fois plus petits par rapport à ceux du SAS8 et du HM20. Ils sont métriques. La composante Up la plus exacte est celle calculée par le HM20 et la moins exacte par le SAS8. L'exactitude de cette composante varie entre 1 et 8 mètres (Tableau 16). Cet écart en Up est visible sur le graphe (Figure 17).

Ensuite, la précision et l'exactitude du positionnement interne du jour 091o réalisé par XIMB sont évaluées. Afin de pouvoir comparer les résultats avec ceux obtenus dans la cage de Faraday à la même période, seules les 600 premières positions calculées par le récepteur sont utilisées.

À cette période, la précision est décimétrique pour les composantes X et Y. Elle est métrique pour la composante Z. L'exactitude en North est de 2,5 mètres. Elle est décimétrique dans les autres composantes (Tableau 16).

XIMA, placé dans la cage de Faraday, a un écart type en Z deux fois plus petit. L'exactitude en North est également meilleure pour XIMA. Cependant, ces résultats sont obtenus sur une très courte période et ne sont, par conséquent, peut-être pas totalement représentatifs.

La différence entre les précisions du XIM8 et du XIMB selon le jour de l'année est liée au manque de données disponibles pour le jour 091. La durée des périodes étant très différente, il n'est pas possible d'effectuer des comparaisons.

Tableau 16: Précisions et exactitudes du positionnement interne des smartphones pour les jours 091o et 049n sur le toit du bâtiment B5a

	Précision			Exactitude		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	North (m)	East (m)	Up (m)
Smartphone	091o					
XIMB	0,36286	0,20997	1,58908	-2,43939	0,15840	0,50004
	049n					
XIM8	0,18006	0,15050	0,40886	-2,12687	-0,59651	2,73924
SAS8	6,48990	2,40107	5,97232	-4,78746	1,33424	-7,49311
HM20	0,19052	0,17253	0,21059	-4,98524	-1,31292	-1,22983

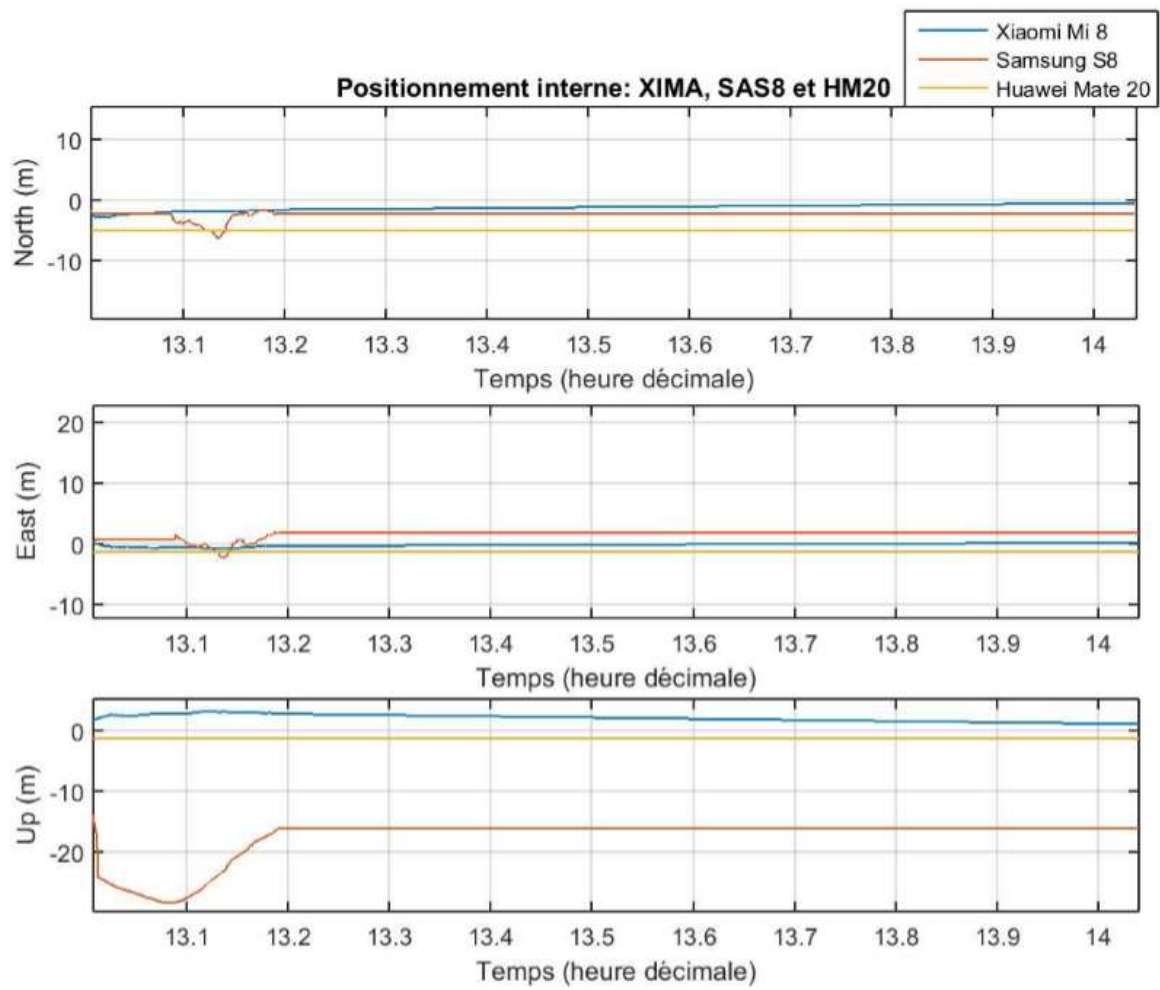


Figure 17: Positionnement interne du XIM 8, du SAS8 et du HM20 au jour 049n sur le toit du bâtiment B5a

Positionnement avec les données brutes

a. SPP

La précision et l'exactitude des positions obtenues grâce au SPP sont calculées pour les Xiaomi Mi 8 (XIM8) lorsque les récoltes de données s'effectuent sur le toit. Les résultats moyens de ces précisions et exactitudes sont présentés au Tableau 17.

La Figure 18 illustre le résultat du positionnement SPP au jour 246k.

Les écarts types moyens des positions calculées aux différentes périodes selon les composantes XYZ sont métriques, avec 3 mètres pour la composante Z (Tableau 17).

L'exactitude est métrique en North et en Up. Elle vaut un demi-mètre en East (Tableau 17). Le bruit selon les composantes NEU est visible sur le graphe (Figure 18). Il est plus important pour la composante Up.

Les résultats obtenus avec le positionnement interne sont plus précis, mais moins exacts que lorsque le SPP est appliqué sur les données brutes (Tableau 16). L'exactitude moyenne de la composante East est équivalente pour les deux positionnements.

Tableau 17: Précisions et exactitudes moyennes du SPP avec les données du Xiaomi Mi 8 pour les jours 246k, 246m, 045j et 049n sur le toit du bâtiment B5a

Rover	Précision			Exactitude		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	North (m)	East (m)	Up (m)
XIM8	2,41287	1,17510	3,01278	1,30941	0,46491	1,16502

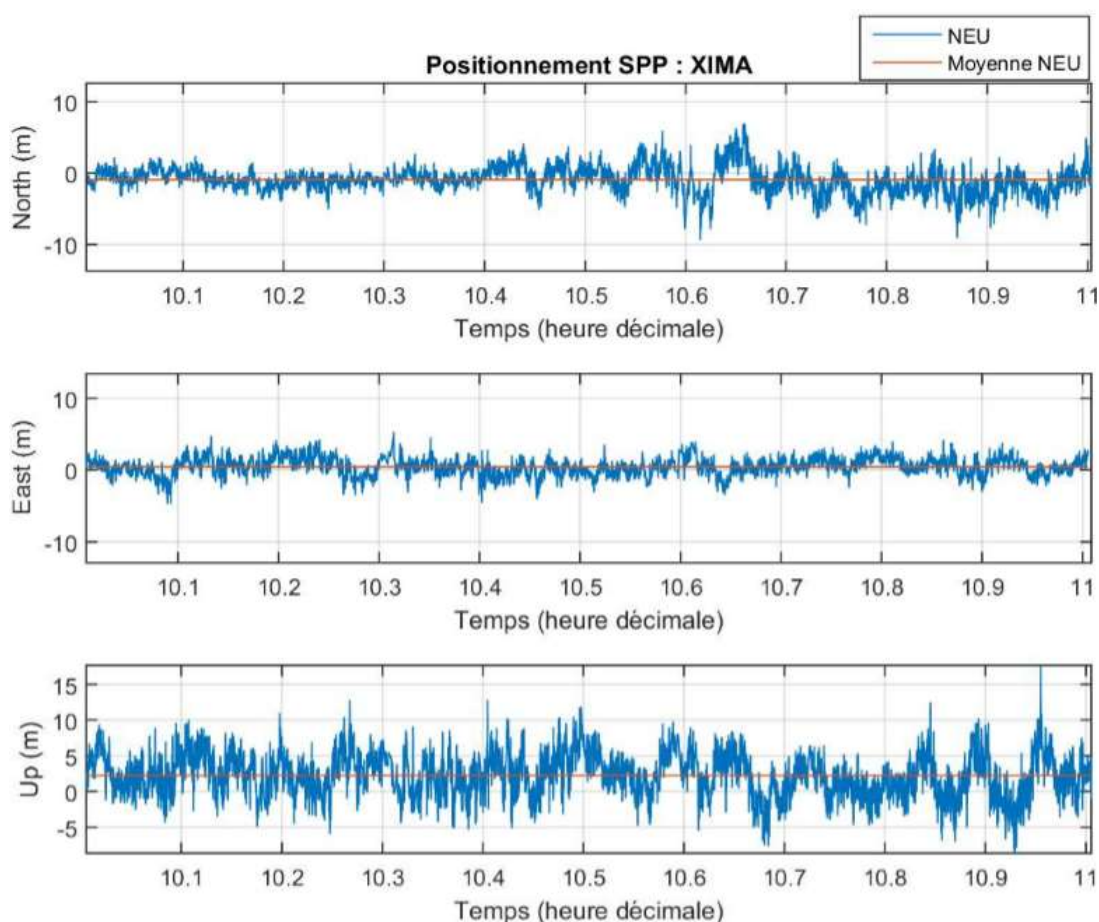


Figure 18: SPP du XIM8 avec les constellations GPS et Galileo au jour 246k sur le toit du bâtiment B5a

b. DGNSS

La précision et l'exactitude moyennes du positionnement du Xiaomi Mi 8 (XIMB) avec le DGNSS sont calculées. Les *base stations* utilisées sont soit le récepteur géodésique (X400) ou le Xiaomi Mo 8 (XIMA) (Tableau 18).

La Figure 19 est un exemple représentatif du DGNSS entre XIMA et XIMB.

Les précisions obtenues en monofréquences avec X400 en *base station* sont en moyenne de 2 mètres. Ces précisions valent 3 mètres lorsque la *base station* est XIMA. Les écarts types des positions calculées en multifréquence sont plus petits d'1 mètre par rapport à ceux obtenus en monofréquence pour toutes les *base stations* (Tableau 18). Cette différence est de l'ordre de la précision des codes (Tableau 15).

L'exactitude moyenne du DGNSS avec X400 comme *base station* varie de 0,5 à 1 mètre. Elle varie de 0,2 à 1,5 mètre lorsque la *base station* est XIMA (Tableau 18). Les différences d'exactitude entre les résultats mono ou multifréquence sont de quelques décimètres. Elles ne sont pas significatives étant la précision des codes (Tableau 15).

Le graphe montre que le bruit dans la composante Up est plus important que dans les autres composantes (Figure 19). Il montre également que cette composante est la moins exacte.

Tableau 18: Précisions et exactitudes moyennes du DGNSS avec les données du Xiaomi Mi 8 pour les jours 246k, 246m, 045j et 049n sur le toit du bâtiment B5a

		Précision			Exactitude		
		X (m)	Y (m)	Z (m)	North (m)	East (m)	Up (m)
Base Station	Rover	L1/E1					
X400	XIMB	2,20370	1,43645	2,90737	-0,72671	-0,51254	0,68369
XIMA	XIMB	3,15158	2,09356	4,59620	0,21032	0,72727	-1,55032
L1+L5/E1+E5							
X400	XIMB	1,62738	1,09760	2,20984	-0,53401	-0,53589	0,45280
XIMA	XIMB	2,31828	1,61271	3,49953	0,13410	0,69988	-0,98981

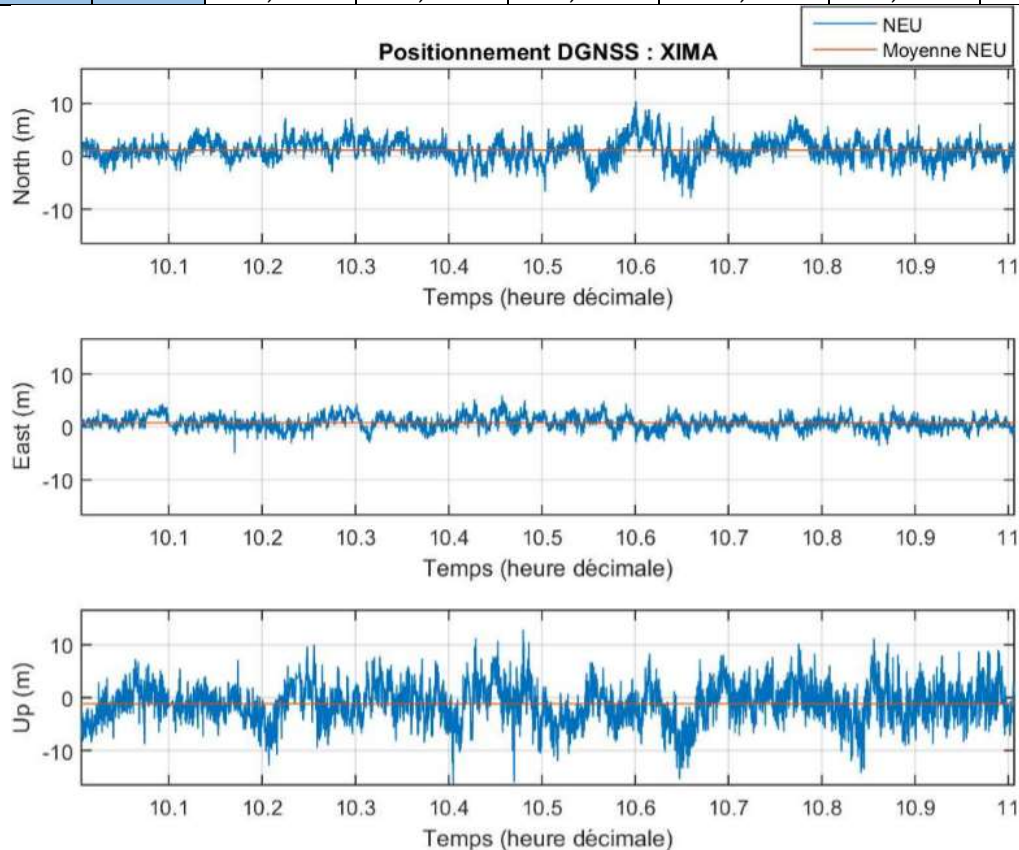


Figure 19: DGNSS (L1-L5/E1-E5) XIMA et XIMB avec les constellations GPS et Galileo au jour 246k sur le toit du bâtiment B5a

c. Positionnement relatif

La qualité moyenne du positionnement relatif effectué grâce aux données des smartphones posés sur le toit du bâtiment B5a est évaluée (Tableau 19). Cela est réalisé avec des lignes de base entre deux Xiaomi Mi 8 (XIMA-XIMB) et entre un récepteur géodésique et un Xiaomi Mi 8 (X400-XIMB).

La Figure 20 permet d'illustrer ce positionnement avec la combinaison XIMA-XIMB. Les résultats convergent après le calcul des 12 premières minutes. Ce temps de convergence est représentatif des résultats obtenus pour les autres périodes. C'est pourquoi l'évaluation de la précision et de l'exactitude ne prend pas en compte les 12 premières minutes de résultats.

La précision moyenne du positionnement relatif XIMA-XIMB et X400-XIMB est centimétrique. L'exactitude est centimétrique ou décimétrique (Tableau 19). Les différences de précision et d'exactitude entre les résultats en mono ou en bifréquence sont de l'ordre de la précision des phases dans ce contexte environnemental lorsque la *base station* est XIMA (Tableau 15). Les résultats en bifréquence n'améliorent pas la qualité du positionnement.

Tableau 19: Précisions et exactitudes moyennes du positionnement relatif avec les données du Xiaomi Mi 8 pour les jours 246k, 246m, 045j et 049n sur le toit du bâtiment B5a

		Précision			Exactitude		
		North (m)	East (m)	Up (m)	North (m)	East (m)	Up (m)
Base Station	Rover	L1/E1					
X400	XIMB	0,02492	0,04247	0,02626	0,16059	0,03790	0,14555
XIMA	XIMB	0,03286	0,05968	0,05375	0,04653	-0,04102	0,08308
		L1+L5/E1+E5					
X400	XIMB	0,02041	0,04523	0,03048	0,15539	0,06428	0,17068
XIMA	XIMB	0,04064	0,06696	0,08576	0,04554	-0,06094	0,14362

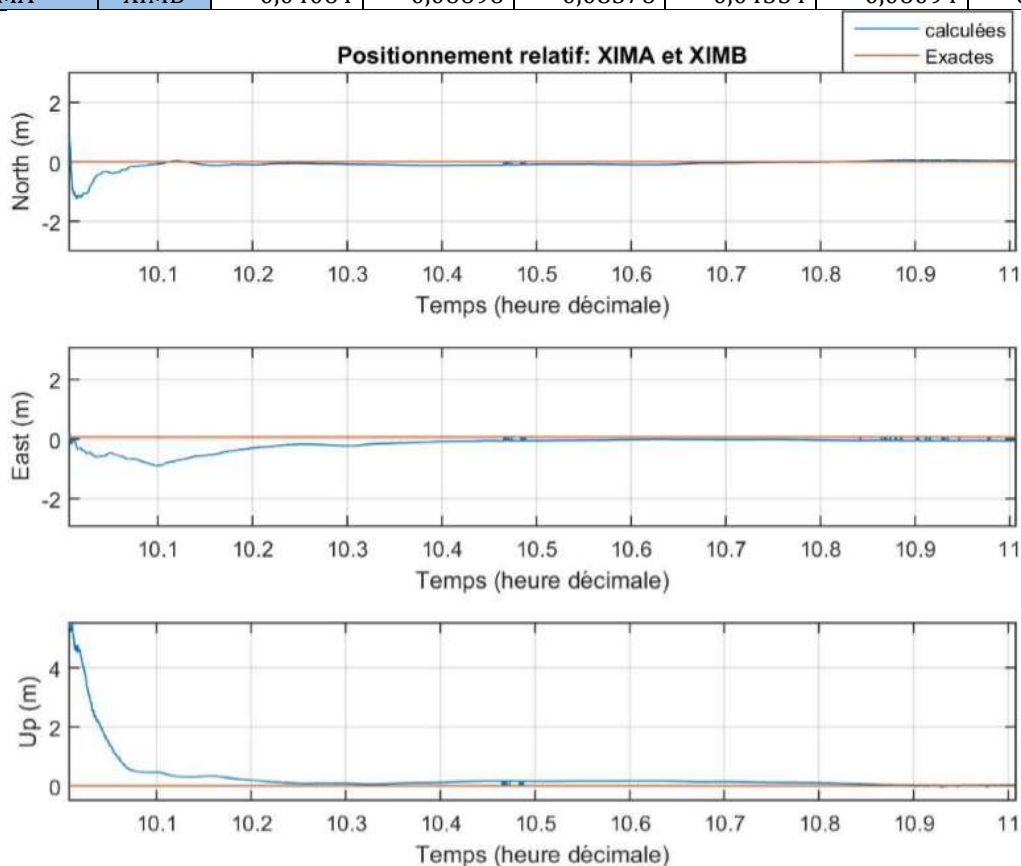


Figure 20: Positionnement relatif (L1-L5/E1-E5) XIMA et XIMB avec les constellations GPS et Galileo au jour 246k sur le toit du bâtiment B5a

6.4 Jardin de Neupré

La dernière série de résultats concernant le positionnement des smartphones correspond aux expériences réalisées dans un jardin de la commune de Neupré. Les données ont été récoltées au jour de l'année 0481 sur une durée d'une heure (Annexe 1). Étant donné qu'une seule récolte de données a été effectuée, les résultats fournis ne sont peut-être pas représentatifs. Ils permettent, cependant, d'obtenir une idée de l'ordre de grandeur de la qualité des observables et des positionnements.

Qualité des observables

La qualité moyenne des observables est évaluée en réalisant des doubles différences avec les données des Xiaomi Mi 8 (XIMA et XIMB) sur les codes et les phases (Équation 10 à 15). La Figure 21 et la Figure 22 sont des exemples du résultat des doubles différences de codes et de phases.

Les doubles différences de phases, dans cet environnement, sont affectées d'un grand nombre de sauts de cycles, comme illustré à la Figure 23. La précision de l'observable de phase est calculée pour les périodes sans sauts de cycles (Figure 22) ou en supprimant les sauts de cycles. Elle n'a pas pu être calculée pour toutes les combinaisons de satellites étant donné la complexité apportée par les nombreux sauts de cycles. La précision moyenne calculée pour cette observable est centimétrique (Tableau 20).

Si les hypothèses posées lors de l'établissement des équations sont vérifiées, la valeur moyenne des doubles différences de phases doit être proche d'un entier. Ce n'est pas le cas pour l'exemple présenté à la Figure 22. Cela est lié à la présence des sauts de cycles encore présents et qui n'ont pas été supprimés.

La précision moyenne des codes est d'une dizaine de mètres (Tableau 20). Ce résultat est dû au multitrajet qui est davantage présent dans ce type d'environnement. En effet, ce dernier, qui est associé au bruit selon les hypothèses formulées, est la combinaison du multitrajet des quatre observations participant à la formation des doubles différences. Les smartphones sont très sensibles à ce phénomène (Pesyna *et al.*, 2014). Comme attendu selon les hypothèses posées, la valeur moyenne des doubles différences de codes est proche de zéro (Figure 21).

Tableau 20: Précisions moyennes des codes et des phases pour la constellation GPS et pour la fréquence L1 dans le jardin de la commune de Neupré

Constellation	Codes (m)	Phases (m)
	L1/E1	L1/E1
GPS	11,50612	0,02337

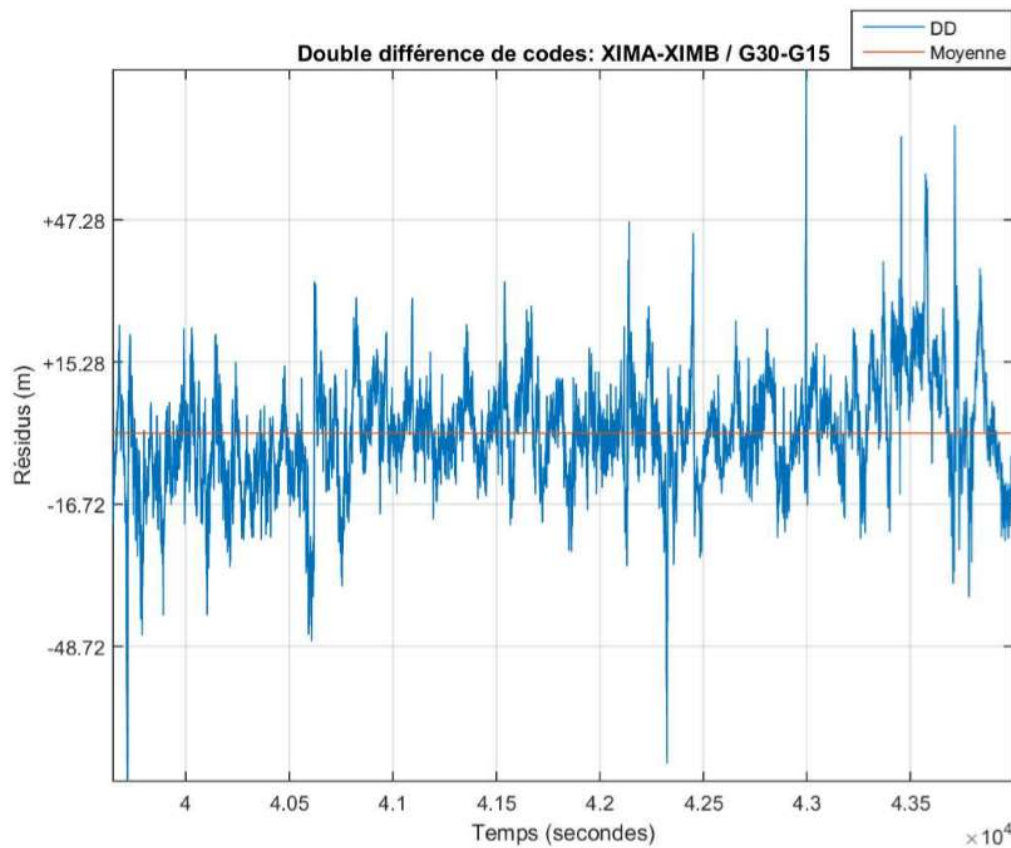


Figure 21: Double différence de codes GPS (L1) entre XIMA et XIMB et les satellites G30 et G15 dans le jardin au DOY 0481 (Échelle : 32m)

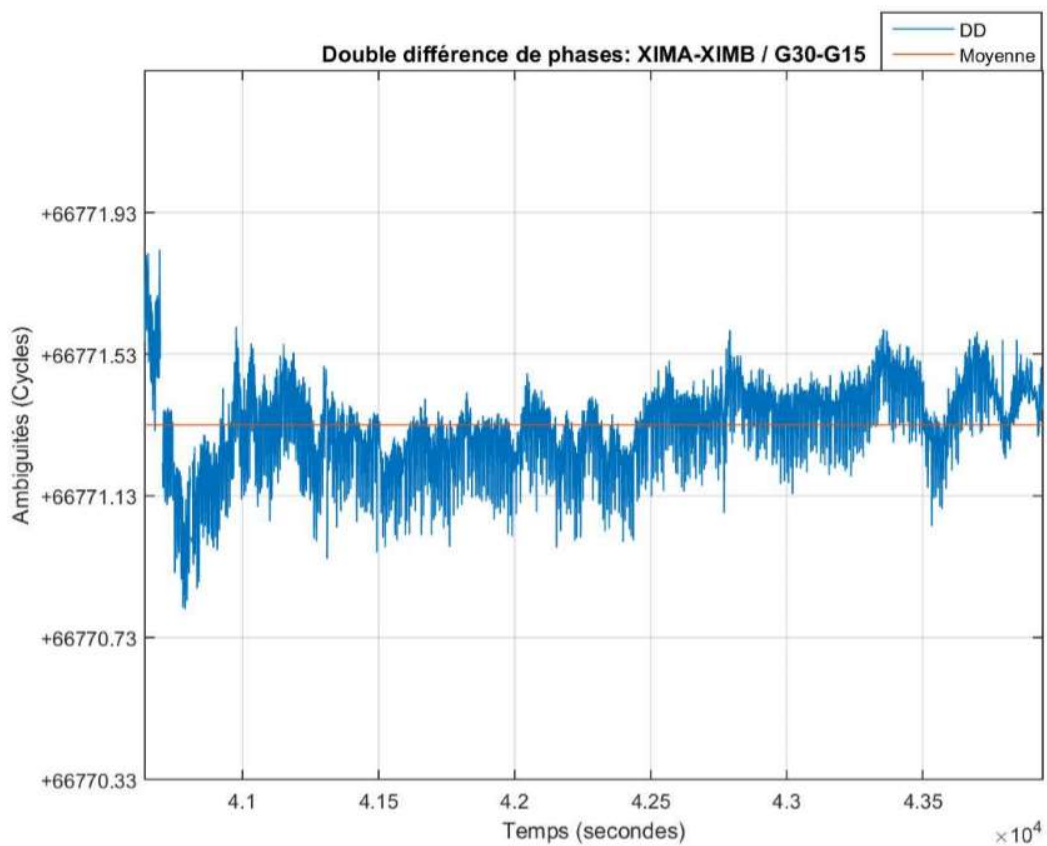


Figure 22: Double différence de phases GPS (L1) entre XIMA et XIMB et les satellites G30 et G15 dans le jardin au DOY 0481 (Échelle : 0,4 cycle)

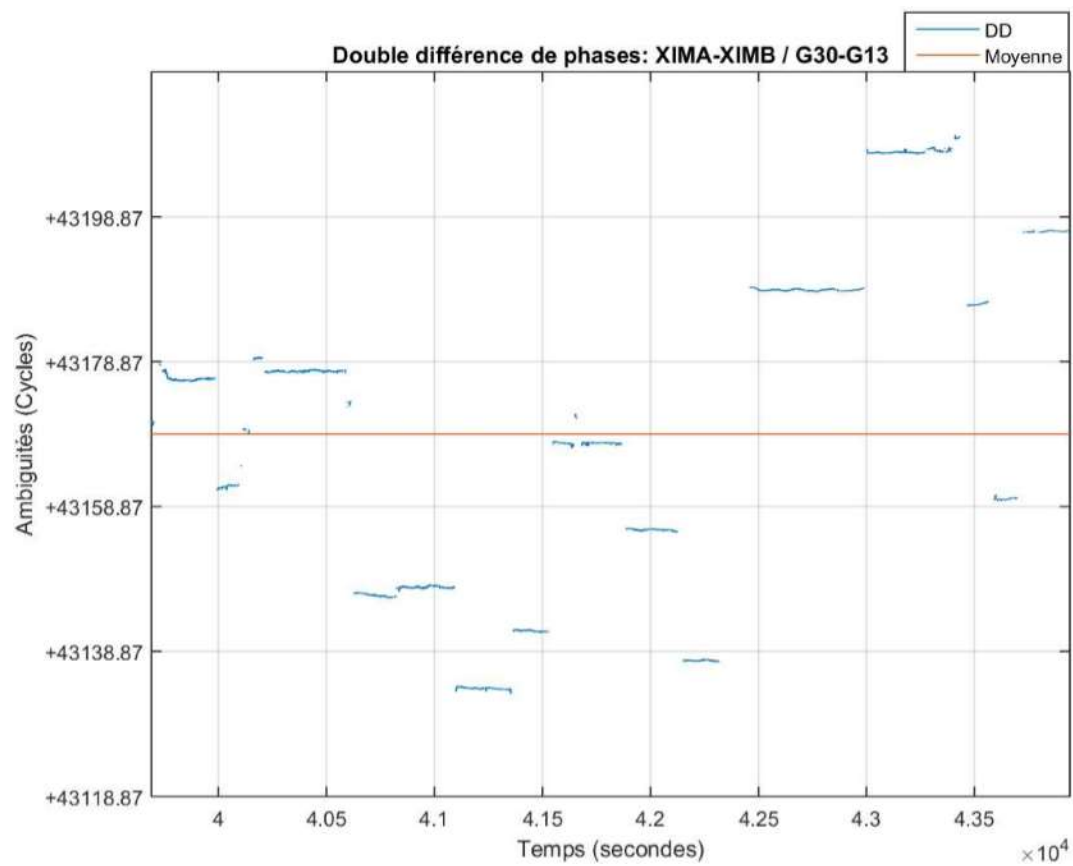


Figure 23: Double différence de phases GPS (L1) entre XIMA et XIMB et les satellites G30 et G13 dans le jardin au DOY 0481 avec sauts de cycles (Échelle : 20 cycles)

Positionnement interne

Le Xiaomi Mi 8 (XIM8) et le Samsung S8 (SAS8) posés sur une caisse dans le jardin de Neupré ont calculé leur position. La précision de ce positionnement est évaluée. Les coordonnées du point où se trouvent les smartphones ne sont pas connues. Il n'est donc pas possible de calculer l'exactitude de positionnement.

La précision obtenue par le XIM8 est métrique. Celle calculée à partir des positions du SAS8 qui est également métrique (Tableau 21). La variabilité des positions calculées d'une seconde à l'autre par le SAS8 est plus importante que celle des positions du XIM8. En effet, les résultats de ce dernier semblent plus lisses au cours du temps (Figure 24).

La différence entre les précisions obtenues par le XIM8 et le SAS8 est discutée dans la partie « Discussions ».

Tableau 21: Précisions du positionnement interne des smartphones pour les jours 048l dans le jardin

Smartphone	Précision		
	X (m)	Y (m)	Z (m)
	048l		
XIM8	1,62098	0,85548	3,36914
SAS8	5,22404	2,83222	4,19060

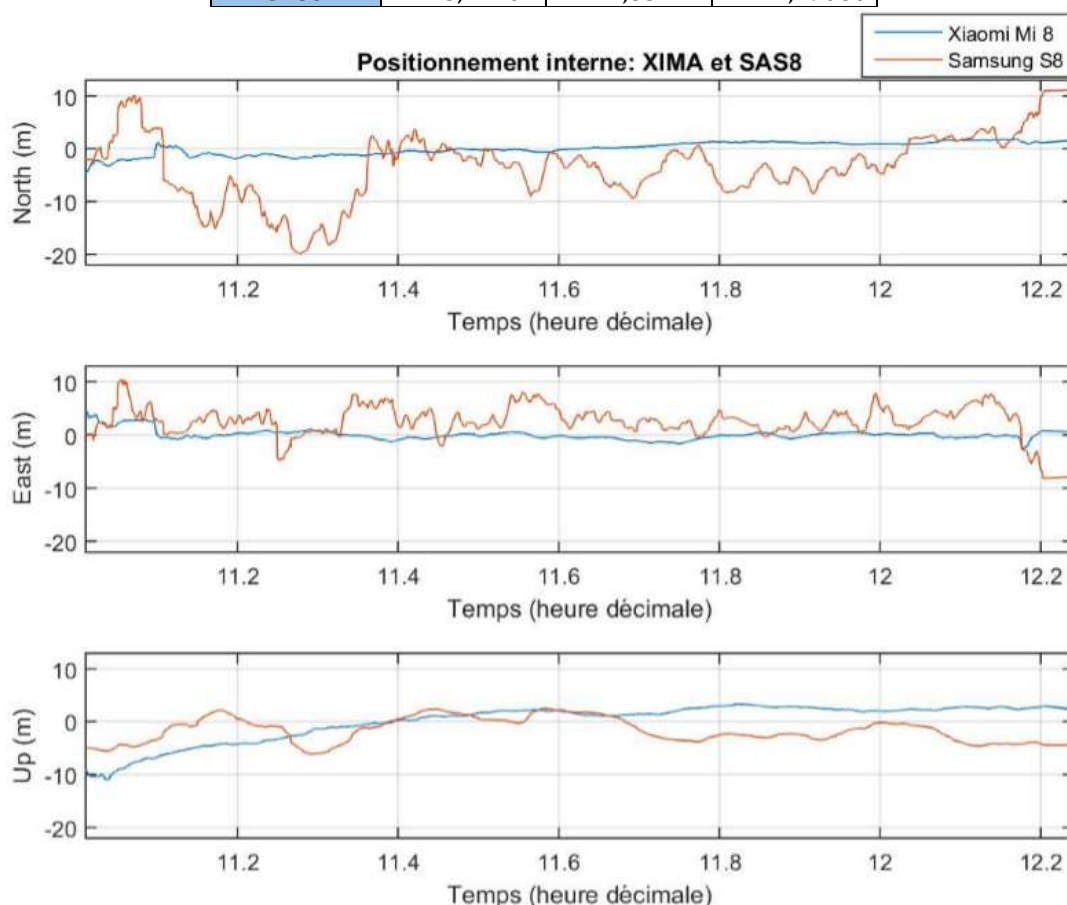


Figure 24: Positionnement interne du XIM8 et du SAS8 au jour 048l dans le jardin par rapport à la moyenne mise à zéro du XIM8

Positionnement avec les données brutes

a. SPP

La qualité des positions obtenues en appliquant la technique du SPP est évaluée pour le smartphone Xiaomi Mi 8 (XIM8) dans le contexte du jardin (Figure 25). Sur le graphe, le comportement des positions calculées change après 36 minutes d'expérience. Cela est dû au fait que le récepteur du smartphone ne parvient plus à capter suffisamment de satellites différents au-delà de cette période. Il n'est par conséquent pas possible de calculer une position toutes les secondes (Annexe 2). Ce fait est lié à l'environnement. En effet, il existe plusieurs obstacles susceptibles de bloquer la visibilité comme une maison et des arbres. L'amplitude des valeurs maximum et minimum des composantes XYZ reste similaire avant et après cette période. La précision des positions varie entre 3 et 8 mètres selon les composantes XYZ pour le jour 0481 (Tableau 22). La composante la plus précise est Y.

La qualité du positionnement dans cet environnement est moins bonne que celle obtenue sur le toit (Tableau 11) ou dans la cage de Faraday (Tableau 6). Cela s'explique par la précision des observables. En effet, la qualité des codes dans le jardin est inférieure à celle des autres environnements présentés (Tableau 5 et Tableau 9). Cela est en partie lié au multitrajet présent dans le jardin.

La valeur des écarts types de toutes les composantes XYZ du positionnement du XIM8 avec le SPP est plus grande par rapport au positionnement interne du XIM8. Cela peut être dû au fait que le récepteur XIM8 utilise d'autres capteurs que la puce GNSS pour calculer sa position interne. La précision du résultat interne n'est donc pas aussi dépendante de la qualité des observables par rapport au positionnement avec les données brutes.

Tableau 22 : Précisions du SPP avec les données du Xiaomi Mi 8 pour le jour 0481 dans le jardin

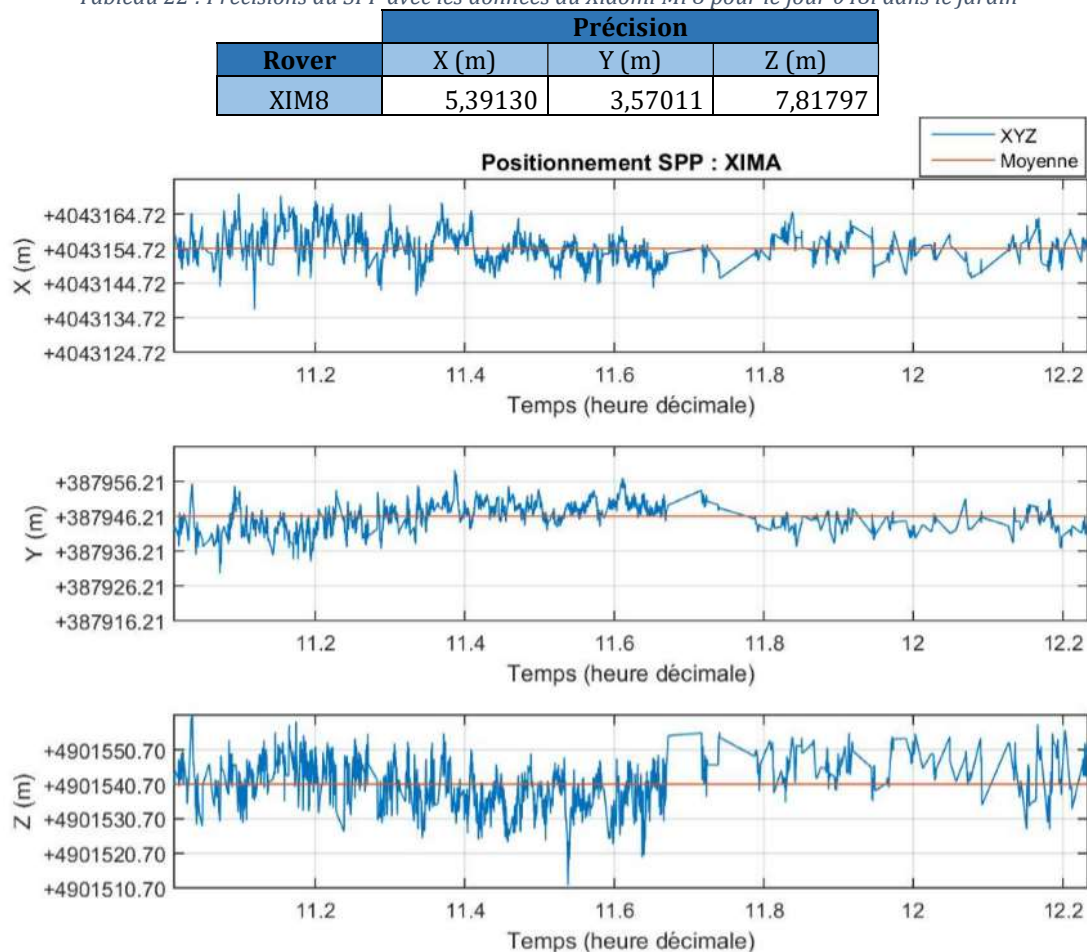


Figure 25 : SPP du XIM 8 avec les constellations GPS et Galileo au jour 0481 dans le jardin

b. DGNSS

Dans le contexte environnemental du jardin, le résultat des positions calculées avec le DGNSS est exprimé sous la forme des composantes NEU de la ligne de base entre le *rover* Xiaomi Mi 8 (XIMB) dont la position est recherchée et la *base station* de type géodésique ou smartphone (X400 ou XIMA), apportant les corrections différentielles. Cela permet d'estimer une exactitude pour le DGNSS effectué entre deux smartphones. En effet, même si la position exacte absolue n'est pas connue, les valeurs des composantes de la ligne de base entre deux smartphones le sont. Lors d'un positionnement en utilisant le DGNSS, la position a priori de la *base station* doit être fournie. L'exactitude de cette position a priori n'influence pas de manière significative les résultats des composantes de la ligne de base étant donné la précision des codes et des phases (Tableau 20) (Annexe 3). La position a priori utilisée est la position interne calculée par le smartphone.

La précision est évaluée pour les positions calculées avec les lignes de base X400-XIMB et XIMA-XIMB. L'exactitude n'est obtenue que pour la ligne de base XIMA-XIMB.

La Figure 26 illustre les résultats obtenus en appliquant le DGNSS sur la ligne de base XIMA-XIMB.

Tout d'abord, la précision des positions calculées au jour 0481 est analysée (Tableau 23). Elle vaut plusieurs mètres pour les lignes de base X400-XIMB et XIMA-XIMB. L'écart type est le plus petit pour la composante East (Figure 26). Les précisions obtenues bifréquence sont améliorées de manière métrique. Cela n'est pas significatif selon la précision des codes (Tableau 20).

Quant à l'exactitude pour le DGNSS entre XIMA et XIMB, elle est submétrique pour toutes les composantes. Les résultats en mono ou en bifréquence varient de quelques dizaines de centimètres. Cette différence n'est pas significative (Tableau 20).

La différence de comportement observée après les 36 premières minutes est visible pour cette technique de positionnement (Figure 26). Le nombre de positions calculées diminue à partir de cette période (Annexe 2).

Les écarts types ont une valeur élevée suite au multitrajet présent dans cet environnement et affectant la qualité des codes.

Tableau 23: : Précisions et exactitudes du DGNSS avec les données du Xiaomi Mi 8 pour le jour 0481 dans le jardin

		Précision			Exactitude		
		X (m)	Y (m)	Z (m)	North (m)	East (m)	Up (m)
Base Station	Rover	L1/E1					
X400	XIMB	6,61362	3,06831	7,18096			
XIMA	XIMB	9,02772	4,88026	9,46981	0,39076	-0,83250	-0,43215
		L1+L5/E1+E5					
X400	XIMB	4,97398	3,25917	5,40335			
XIMA	XIMB	8,37827	3,70156	8,94614	0,99097	-0,25066	-0,57002

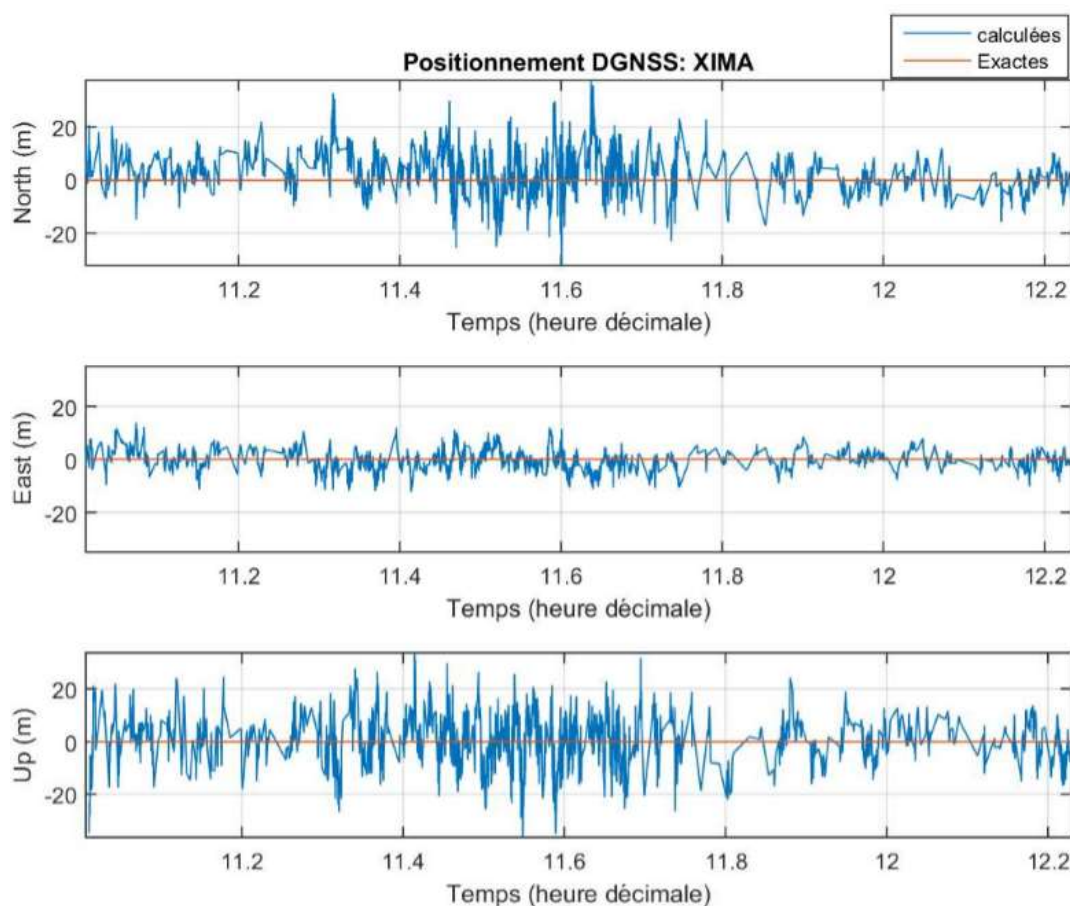


Figure 26: DGNSS (L1-L5/E1-E5) XIMA et XIMB avec les constellations GPS et Galileo au jour 0481 dans le jardin

c. Positionnement relatif

Comme dans le cas du DGNSS, la précision des positions obtenues avec le positionnement relatif est évaluée pour les lignes de base X400-XIMB et XIMA-XIMB. L'exactitude n'est obtenue que pour la ligne de base XIMA-XIMB. La position a priori utilisée pour calculer les composantes de la ligne de base est la position interne calculée par le smartphone.

La Figure 27 illustre le résultat du positionnement relatif sur la ligne de base XIMA-XIMB.

Les précisions sont submétriques (Tableau 24). Le calcul en bifrèquence pour ligne de base XIMA-XIMB est deux fois plus précis que celui en monofrèquence. L'apport du multifrèquence n'est pas aussi significatif pour les résultats obtenus sur la ligne de base X400-XIMB.

Ensuite, l'exactitude du positionnement pour la ligne de base XIMA-XIMB vaut plusieurs mètres pour les composantes North et Up. Elle est submétrique pour la composante East (Tableau 24). Les valeurs des composantes de la ligne de base convergent, mais avec un décalage métrique par rapport aux valeurs exactes (Figure 27).

Les résultats de ce positionnement étant plus lisses au cours du temps, l'impact de la baisse du nombre de positions à partir de la 36^{ème} minute n'est pas visible sur le graphe (Figure 27). Cependant, cette technique de positionnement est concernée par la diminution du nombre de positions calculées à partir de cette période (Annexe 2).

Tableau 24: Précisions et exactitudes du positionnement relatif avec les données du Xiaomi Mi 8 pour le jour 0481 dans le jardin

		Précision			Exactitude		
		North (m)	East (m)	Up (m)	North (m)	East (m)	Up (m)
Base Station	Rover	L1/E1					
X400	XIMB	0,59371	0,66349	0,88134			
XIMA	XIMB	1,16958	0,60600	0,55565	-7,63764	-0,93706	-3,16463
		L1+L5/E1+E5					
X400	XIMB	0,52893	0,44697	0,51709			
XIMA	XIMB	0,34342	0,31959	0,22803	-4,28980	-0,21631	-2,09269

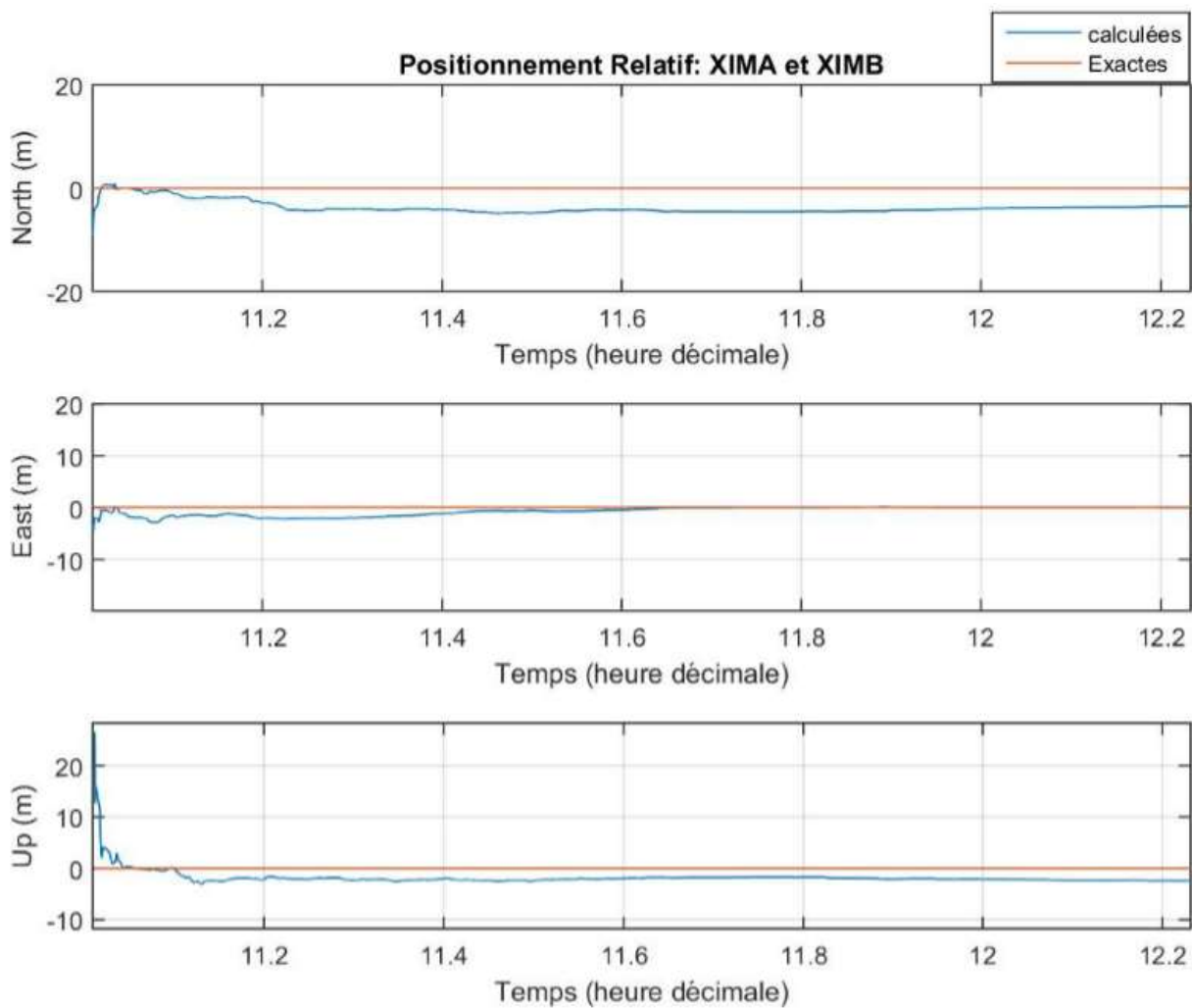


Figure 27: Positionnement relatif (L1-L5/E1-E5) XIMA et XIMB avec les constellations GPS et Galileo au jour 0481 dans le jardin

7. Discussion

Ce chapitre a pour but de discuter les résultats présentés dans la partie précédente de ce travail. Il est divisé en plusieurs parties. Les deux premières parties concernent la qualité des observables et du positionnement interne. La troisième et la quatrième partie analysent les résultats et la qualité du positionnement avec les données brutes. La cinquième partie porte sur une comparaison des positions internes et des positions calculées à partir des données brutes. La dernière partie est consacrée à l'analyse des limitations du travail et des résultats.

7.1 Qualité des observables

La précision des observables, codes et phases, a été déterminée pour les récepteurs géodésiques, X400 et X501, et pour les Xiaomi Mi 8, XIMA et XIMB, dans les différents environnements.

Une discussion de ces résultats est réalisée en fonction du type de récepteur, de l'environnement et de la fréquence appliqués.

Tout d'abord, les précisions des observables sont calculées pour les récepteurs géodésiques et pour les Xiaomi Mi 8. Pour les récepteurs géodésiques, les codes ont une précision de 0,1 mètre et les phases ont une précision de 0,001 mètre. Ces valeurs sont un ordre de grandeur plus élevé pour les Xiaomi Mi 8 dans la cage de Faraday. En effet, la précision des codes est de plusieurs décimètres et celle des phases est centimétrique. Ce résultat permet de mettre en avant la différence de qualité du récepteur du Xiaomi Mi 8 par rapport à un récepteur géodésique. Cette précision influence les résultats de positionnement.

Ensuite, la qualité des observables du récepteur dans le Xiaomi Mi 8 est évaluée dans les différents contextes environnementaux.

La précision des phases dans la cage de Faraday et sur le toit du bâtiment B5a est centimétrique. La précision des phases dans le jardin est également centimétrique, mais il existe de nombreux sauts de cycles.

La précision des codes dans la cage de Faraday est décimétrique. Cette précision est métrique sur le toit du bâtiment B5a. Elle est de plusieurs mètres dans le jardin de Neupré.

L'influence de l'environnement est donc plus importante pour la précision des codes que celles des phases. Cela est sûrement dû à la présence du multitrajet qui varie selon les environnements. En effet, les codes sont les observables qui sont les plus sensibles au multitrajet (Sanz Subirana et al., 2013). De plus, les smartphones ont une antenne qui utilise la polarisation linéaire (Pesyna et al., 2014). Elle est donc vulnérable au multitrajet.

Enfin, la précision des codes et des phases est estimée pour les deux fréquences L1-E1 et L5-E5a.

En ce qui concerne les résultats obtenus avec les récepteurs géodésiques, la qualité des codes et des phases est similaire pour toutes les fréquences. Cependant, la qualité est évaluée sur une heure de données. Les conclusions pourraient être différentes sur une plus longue période. La qualité des codes du Xiaomi Mi 8 dans la cage de Faraday est améliorée de plusieurs décimètres lorsque les fréquences L5-E5a sont considérées. La qualité des codes est deux fois plus grande lorsque les signaux Galileo sont utilisés.

La qualité des phases des Xiaomi Mi 8 placés dans la cage de Faraday et sur le toit du bâtiment B5a varie de plus ou moins quelques millimètres en fonction des fréquences et des constellations. Ces différences ne sont pas significatives.

L'apport de la deuxième fréquence L5-E5a permet, par conséquent, d'améliorer la qualité des codes. Cela influence le positionnement lorsque ce dernier utilise les codes comme observable de base.

Pour le Xiaomi Mi 8, la qualité des codes dépend donc des fréquences, des constellations GNSS et de l'environnement considéré. La précision des phases semble être plus indépendante de ces facteurs.

La qualité des positionnements réalisés par le récepteur du smartphone ou à partir des données brutes est d'abord fonction de la qualité des observables utilisées dans les calculs.

7.2 Qualité du positionnement interne

La qualité du positionnement interne du Xiaomi Mi 8, du Samsung S8 et de l'Huawei Mate 20 Pro est évaluée dans les différents environnements.

Les résultats sont discutés en comparant les performances des smartphones et l'influence de l'environnement.

La qualité des positions internes dépend des smartphones utilisés. La manière dont les positions sont calculées est inconnue et est différente en fonction du récepteur contenu dans l'appareil. Il est cependant possible de faire des suppositions.

Premièrement, la valeur de l'écart type des positions calculées par le Xiaomi Mi 8 dans la cage de Faraday est plus grande, et donc moins précise, par rapport à celle observée pour les positions du Samsung S8. Sur le toit du bâtiment B5a et dans le jardin de Neupré, ce constat est inversé, car le Xiaomi fournit des positions plus précises. De plus, le comportement des positions calculées au cours du temps par le Xiaomi Mi 8 dans la cage de Faraday est différent de celui observé dans les autres environnements. Ce phénomène peut être expliqué par l'utilisation plus importante d'autres capteurs présents dans le smartphone pour soutenir le récepteur qui calcule les positions. En effet, la cage de Faraday permet une bonne réception des signaux GNSS. En revanche, elle bloque ou rend difficile l'utilisation d'autres capteurs comme le magnétomètre, dégradant le positionnement interne. De plus, au jour 0910, les positions du Xiaomi Mi 8 dans la cage de Faraday ne sont obtenues que pour les 600 premières secondes. Cette observation peut également être liée à l'utilisation des capteurs. En effet, il est possible de poser l'hypothèse que le récepteur n'a pas réussi à utiliser les autres capteurs dans l'environnement et n'a donc pas pu calculer de positions.

Le Samsung S8 semble parvenir à calculer des positions sans ces capteurs. En effet, son positionnement dans la cage de Faraday est de meilleure qualité. D'autres tests seraient nécessaires afin d'obtenir un nombre suffisant de données et de résultats pour tirer des conclusions.

Deuxièmement, le comportement des positions calculées par le Samsung S8 dans les différents contextes environnementaux est différent de celui du Xiaomi Mi 8 et de l'Huawei Mate 20 Pro. Il a une variabilité au cours du temps plus importante. Cela peut venir du fait que le récepteur du Samsung S8 utilise moins les autres capteurs présents dans le smartphone, comme l'accéléromètre. Une seconde explication est que la puce GNSS du Samsung S8 est monofréquence, contrairement à celle du Xiaomi Mi 8 et de l'Huawei Mate 20 Pro qui sont bifréquence. L'exploitation de cette seconde fréquence dans les calculs permettrait d'être plus précis.

Troisièmement, selon les différents environnements de test, le Xiaomi Mi 8 fournit des positions plus exactes de plusieurs mètres par rapport au Samsung S8. Sur le toit du bâtiment B5a, le Xiaomi Mi 8 calcule des positions deux fois plus exactes par rapport à l'Huawei Mate 20 Pro, à l'exception cependant de la composante Up. Ces résultats sont dus, d'une part, aux algorithmes présents dans le récepteur calculant les positions en combinant les données GNSS et des autres capteurs et, d'autre part, aux fréquences gérées par le récepteur.

L'expérience du jour 0910 devait permettre de comparer l'influence de l'environnement sur des positions calculées au même moment. Les résultats pour les 600 premières secondes indiquent

que l'écart type en Z est deux fois plus petit dans la cage de Faraday. La précision des autres composantes est similaire. L'exactitude de la composante North est plus exacte également dans la cage de Faraday. Cela peut être dû au fait que l'antenne ULG0, à laquelle le XIMA est « connecté » dans la cage de Faraday, capte un ou des satellites en plus. En effet, les antennes ULG0 et ULG1 étant en hauteur ont une meilleure visibilité que le XIMB, qui est posé au sol sur le toit. De plus, le masque d'élévation utilisé par le récepteur du XIMB lors de ses calculs de positionnement n'est pas connu. Il n'est, par conséquent, pas possible de savoir si XIMB capte des satellites à basse élévation apportant plus de bruit, de multitrajet, et d'erreurs atmosphériques.

Ces résultats, étant basés sur une période assez courte, ils ne sont peut-être pas représentatifs.

En conclusion, le Xiaomi Mi 8, possédant un récepteur bifréquence, est plus performant que le Samsung S8. Cela peut être lié à la manière dont le récepteur calcule la position avec l'utilisation d'autres capteurs. Ce gain en performance peut également provenir de la capacité de la puce à exploiter deux fréquences. Les observables de code de la seconde fréquence étant plus précises, le positionnement l'est également. De plus, la deuxième fréquence peut être utilisée pour éliminer l'effet de l'ionosphère, par exemple. Cependant, les calculs effectués par le récepteur n'étant pas connus, il n'est pas possible de savoir exactement comment le smartphone exploite cette seconde fréquence.

7.3 Résultats des données brutes

Différents résultats obtenus à partir des données brutes du Xiaomi Mi 8 sont discutés. Ces derniers sont ceux obtenus en appliquant le positionnement relatif.

Influence des centres de phase

Le Tableau 14 reprend les résultats obtenus lors de l'expérience menée dans la cage de Faraday pour évaluer l'influence des centres de phase des smartphones.

Tout d'abord, la différence de qualité des résultats du positionnement relatif entre Xiaomi Mi 8 parallèles, permettant l'élimination de l'influence du centre de phase, et antiparallèles n'est pas significative. En effet, la précision des phases dans la cage de Faraday est centimétrique. Cette comparaison est basée sur des calculs utilisant des données récoltées à des périodes différentes. Cela explique une partie de la différence en précision et en exactitude.

Ensuite, les positions calculées avec les lignes de base X400-XIMA et X400-XIMB, XIMA et XIMB étant placés en antiparallèle, ont des différences de précisions millimétriques. Au niveau de l'exactitude, cette différence est centimétrique, voire décimétrique pour la composante Up. Les deux résultats selon les deux combinaisons étant soumis aux mêmes conditions expérimentales, les différences observées peuvent être attribuées aux erreurs dues au centre de phases et aux erreurs aléatoires, qui sont différentes entre smartphones.

Le centre de phase des Xiaomi Mi 8 peut donc influencer les exactitudes des résultats de quelques centimètres dans la cage de Faraday.

Exactitude dans la cage de Faraday

Le Tableau 13 met en avant une différence d'exactitude selon les combinaisons *base station-rover* dans la cage de Faraday. L'exactitude lorsque la ligne de base est entre deux Xiaomi Mi 8 est centimétrique en North et millimétrique en Up. L'exactitude observée pour la composante North et Up lorsque la *base station* est un récepteur géodésique est décimétrique.

Plusieurs hypothèses peuvent expliquer cette différence.

Premièrement, cela pourrait venir du fait que les composantes de la *zero-baseline* entre les récepteurs ne valent en réalité pas zéro à cause d'artéfacts liés à la fabrication de la cage de Faraday. Cela signifierait que la position du smartphone considérée comme exacte, et donc utilisée pour estimer l'exactitude, n'est pas correcte.

Deuxièmement, le logiciel RTKLib pourrait ne pas prendre en compte le fait que les données proviennent de deux antennes différentes. Le problème serait alors dû aux centres de phase. Troisièmement, le logiciel RTKLib pourrait ne pas gérer le fait que les précisions des observables utilisées dans le positionnement relatif soient différentes. Le problème tirerait son origine des algorithmes du logiciel.

La première hypothèse peut être réfutée par différents moyens. En effet, les exactitudes obtenues pour le positionnement relatif entre Xiaomi Mi 8 indiquent qu'ils forment bien une *zero-baseline*, en prenant en compte la précision des phases associées (Tableau 13).

De plus, il est possible d'utiliser les doubles différences pour démontrer qu'il s'agit bien d'une *zero-baseline* entre le XIMB et X400. En effet, s'il existe une erreur dans la composante de la géométrie de la double différence, une pente se distingue. Cela est illustré en annexe 4 (B). Cette annexe contient notamment un graphe des doubles différences entre récepteurs géodésiques où une erreur de 0,50 mètre en Y a été ajoutée dans la position a priori dans l'antenne ULG1. Cette erreur est de l'ordre de l'exactitude en Up observée dans le Tableau 13. Cela permet de démontrer l'influence d'une erreur dans la position a priori des récepteurs participant à la double différence. Aucune pente n'est présente dans les doubles différences entre un récepteur géodésique et un Xiaomi Mi 8 (Annexe 4 (A)). Les positions a priori, considérant une *zero-baseline*, sont donc exactes.

Enfin, le positionnement relatif entre un Xiaomi Mi 8 et un récepteur géodésique a été calculé avec un autre logiciel en développement au sein de l'unité de géomatique de l'Université de Liège (Annexe 5). Les exactitudes dans toutes les composantes sont centimétriques, même pour la composante Up.

L'erreur d'exactitude ne provient donc ni des données ni de la configuration de la *zero-baseline*. Elle peut provenir de l'utilisation du logiciel RTKLib.

La deuxième hypothèse est testée en modifiant les options concernant les antennes dans le logiciel RTKLib (Annexe 6). Le type de l'antenne ULG0 a été indiqué pour le récepteur géodésique. Le smartphone capte les données qui ont d'abord été réceptionnées par l'antenne géodésique. L'antenne indiquée pour le smartphone est donc la même que celle du récepteur géodésique. En mettant en option le type d'antenne, les exactitudes en North et East restent inchangées. L'exactitude en Up est améliorée de plusieurs décimètres. Ce changement est significatif au regard de la précision des phases dans la cage de Faraday qui est centimétrique. Bien que les signaux passent dans un premier temps par l'antenne géodésique, ils sont également réceptionnés par l'antenne du smartphone dans la cage de Faraday. L'influence du centre phase du Xiaomi Mi 8 peut donc également intervenir pour quelques centimètres. Ainsi, les options d'antenne du logiciel permettent d'améliorer l'exactitude.

La troisième hypothèse peut être partiellement vérifiée en modifiant les options concernant la tolérance du bruit des phases et des codes (Annexe 7). En effet, par défaut, les tolérances sont adaptées aux récepteurs géodésiques. Les valeurs à insérer sont définies sur base des précisions des codes et des phases dans la cage de Faraday (Tableau 9). En modifiant ces options, le bruit des résultats est plus important et l'exactitude en Up n'est pas significativement améliorée.

En conclusion, le problème d'exactitude rencontré pour la composante Up lors du positionnement relatif entre un récepteur géodésique et un Xiaomi Mi 8 ne provient ni des données, ni de la configuration de la *zero-baseline*. En effet, les différents tests effectués montrent que la valeur exacte des composantes de la ligne de base entre X400 et XIMB est zéro. Cela correspond à ce qui est attendu.

L'ajout de l'option d'antenne permet d'améliorer de plusieurs décimètres le décalage. De plus, le centre de phase de l'antenne du Xiaomi Mi 8 dans la cage de Faraday impacte certainement l'exactitude de quelques centimètres.

La source de l'erreur résiduelle n'a pas été trouvée. Elle est sûrement liée à l'utilisation du logiciel RTKLib.

Contrairement au cas de la cage de Faraday, aucun biais particulier n'est obtenu en appliquant le positionnement relatif sur la ligne de base X400-XIMB lorsqu'il est sur le toit. Cela mène à penser qu'un artefact lié au set-up de la cage de Faraday gêne RTKLib dans la résolution du positionnement. En effet, la seule différence entre les set-up expérimentaux est l'utilisation de la cage de Faraday.

Exactitude sur le toit du bâtiment B5a

Le Tableau 19 met également en avant une différence d'exactitude selon les combinaisons *base station-rover*. L'origine de cette différence provient du fait que certains biais sont introduits lors des expériences menées sur le toit.

Tout d'abord, l'exactitude de la composante Up du positionnement relatif entre un smartphone et un récepteur géodésique est décimétrique. Cela résulte du fait que les smartphones sont posés sur une boîte de 0,12 mètre de hauteur. Le point considéré comme étant exact est au sol. Les composantes de la ligne de base exacte sont calculées avec ce point. Un biais est donc introduit par rapport au set-up expérimental. Cette erreur n'existe pas lorsque le positionnement relatif entre deux Xiaomi est réalisé. En effet, les smartphones sont tous les deux posés sur la même boîte. La hauteur de celle-ci par rapport au point au sol n'a donc pas d'influence sur l'exactitude de la ligne de base.

Ensuite, il existe un seul point considéré comme exact. Cependant, deux Xiaomi Mi 8 sont présents dans l'expérience et sont supposés être tous les deux sur ce même point. Il existe donc également un biais horizontal de plusieurs centimètres.

Enfin, le fait de placer les smartphones sur une boîte ne permet pas de les placer exactement au-dessus du point. Un autre biais horizontal est inséré.

7.4 Qualité du positionnement avec les données brutes

Afin d'évaluer le gain en précision et en exactitude qu'il est possible d'obtenir en utilisant un récepteur bifréquence, des positions sont calculées selon les trois techniques et dans les trois environnements. Les résultats concernant le positionnement avec les données brutes sont discutés.

Influence de la qualité du récepteur

La qualité des récepteurs influence la qualité du positionnement. En effet, lorsque les mêmes techniques de positionnement (SPP, DGNS ou positionnement relatif) sont appliquées à des données récoltées le même jour par des récepteurs de qualité différente, il y a une différence de qualité du positionnement.

La qualité du récepteur est traduite dans la qualité des observables. Ainsi, un récepteur géodésique, et donc de bonne qualité, a des observables plus précises qu'un récepteur d'un smartphone. Les précisions des codes et des phases des récepteurs géodésiques sont respectivement décimétriques et millimétriques. Ces mêmes précisions pour les récepteurs des

Xiaomi Mi 8 dans la cage de Faraday sont de l'ordre de plusieurs décimètres et de plusieurs millimètres.

La qualité des observables influence la qualité du positionnement. En effet, si la position d'un récepteur est calculée avec des observables de mauvaise qualité, alors le positionnement, se basant sur ces observables, ne pourra pas être de bonne qualité.

De ce fait, la précision du positionnement est submétrique en SPP, décimétrique en DGNSS et millimétrique en positionnement relatif lorsque les observables des récepteurs géodésiques sont utilisées. La précision des positions est métrique en SPP, métrique à submétrique en DGNSS et centimétrique en positionnement relatif en se basant sur les observables provenant du récepteur du Xiaomi Mi 8.

C'est pourquoi la qualité du récepteur a une incidence sur la précision des résultats.

Influence de l'environnement

Les expériences menées dans le cadre de ce mémoire sont réalisées dans trois environnements différents. Ces derniers possèdent des caractéristiques plus ou moins favorables au positionnement.

Tout d'abord, l'environnement a une influence sur la qualité des observables utilisées pour calculer les positions des récepteurs. En effet, si le contexte est favorable au multitrajet, la précision des codes peut varier de plus d'un ordre de grandeur. Cela explique en partie les différences de qualité des positions calculées dans la cage de Faraday, où le multitrajet est filtré par l'antenne géodésique, et le jardin où le multitrajet est très important. Cela est d'autant vrai que l'antenne des smartphones est très sensible au multitrajet (Pesyna *et al.*, 2014).

De plus, lors du positionnement utilisant les phases, l'environnement peut entraîner la perte des signaux des satellites provoquant des sauts de cycles. Le calcul des positions est alors plus compliqué.

Influence de la technique de positionnement

Dans le cadre du mémoire, trois techniques de positionnement ont été utilisées. Le choix de la technique influence la précision et l'exactitude du positionnement.

Dans la cage de Faraday et sur le toit du bâtiment B5a, la qualité du positionnement est meilleure en appliquant le positionnement relatif. Le SPP donne les positions les moins précises et les moins exactes.

Dans le jardin de Neupré, le DGNSS permet d'obtenir la meilleure qualité de positionnement, avant le positionnement relatif et le SPP.

Ces résultats s'expliquent grâce à la qualité des observables et à l'élimination des erreurs.

Tout d'abord, les techniques de positionnement n'utilisent pas les mêmes observables. Le SPP et le DGNSS se basent sur les codes. Le positionnement relatif s'appuie sur les phases. La précision des phases étant meilleure que celle des codes, le positionnement relatif est donc plus précis. Dans l'environnement du jardin de Neupré, les phases sont affectées par de très nombreux sauts de cycles. Le logiciel utilise alors les codes pour aider à la résolution du positionnement relatif. Le résultat du positionnement relatif est affecté par la combinaison du multitrajet des codes, qui est très élevé dans cet environnement. Cela peut expliquer pourquoi le DGNSS donne des positions de meilleure qualité malgré la précision métrique des codes.

Ensuite, les erreurs présentes dans les équations des observables (Équations 1 et 2) sont gérées de manières différentes selon les techniques de positionnement utilisées. Si les erreurs sont éliminées, alors le positionnement est de meilleure qualité.

Dans le cas du SPP, les erreurs troposphériques et ionosphériques sont modélisées et atténuées grâce au modèle de Saastamoinen et de Klobuchar. Ces modèles sont plus ou moins efficaces selon les conditions atmosphériques du jour de la récolte des données. Les erreurs d'horloge des satellites sont estimées sur base des éphémérides envoyées par ces satellites. L'erreur d'horloge du récepteur fait partie des inconnues du problème. Les erreurs aléatoires et le multitrajet sont les erreurs qui persistent.

Dans le cas du DGNSS, les erreurs troposphériques, ionosphériques, d'horloge des satellites et d'orbites des satellites sont éliminées si les récepteurs sont sur une courte ligne de base. L'erreur d'horloge du récepteur est laissée comme inconnue du problème. Le bruit et le multitrajet, étant une erreur locale, sont combinés.

Dans le cas du positionnement relatif, la formation des simples différences permet d'éliminer les erreurs troposphériques et ionosphériques si les récepteurs sont sur une courte ligne de base. Les erreurs d'horloge des satellites se suppriment également. La réalisation des doubles différences permet d'éliminer l'erreur d'horloge des récepteurs. Il ne reste que le bruit et le multitrajet qui sont combinés lors des deux différences.

Le SPP possède la moins bonne précision, car les erreurs troposphériques et ionosphériques sont estimées à partir de modèles et non à partir d'autres récepteurs.

Le positionnement relatif élimine le plus d'erreurs grâce à la formation des doubles différences. C'est pourquoi c'est cette technique qui permet d'obtenir les positions de meilleure qualité dans la cage de Faraday et sur le toit du bâtiment B5a. Cependant, dans le jardin, à cause des sauts de cycles, le logiciel utilise également les codes. La réalisation du positionnement relatif entre Xiaomi Mi 8 dans cet environnement est par conséquent moins exacte que le DGNSS.

Influence de l'exploitation du bifrèquence

Le Xiaomi Mi 8 possède un récepteur bifrèquence. Les calculs des positions sont réalisés en mono et bifrèquence afin d'évaluer l'apport de la deuxième fréquence.

Pour réaliser le SPP, RTKLib ne permet l'utilisation que des fréquences L1-E1. Il n'est, par conséquent, pas possible d'estimer l'apport de la deuxième fréquence avec cette technique.

Pour les résultats du DGNSS obtenus avec le récepteur géodésique, l'apport du multifréquence est de l'ordre de la précision des codes et des phases. En effet, la différence de qualité entre les fréquences L1-E1 et L5-E5 est centimétrique pour les codes. La différence de qualité obtenue en mono et en bifrèquence lorsque le positionnement relatif est appliqué n'est pas significative.

Dans la cage de Faraday, l'apport du bifrèquence dépend de la technique de positionnement.

En ce qui concerne les résultats obtenus avec le DGNSS, l'utilisation des deux fréquences permet d'améliorer la précision de l'ordre de la précision respective des codes dans chaque environnement. L'apport de la deuxième fréquence dégrade l'exactitude. La variation par rapport aux résultats obtenus en monofréquence n'est pas significative.

La précision et l'exactitude des positions obtenues en appliquant le positionnement relatif avec deux fréquences sont dégradées de l'ordre de la précision des phases par rapport à celles obtenues en monofréquence.

Sur le toit du bâtiment B5a, lorsque le DGNSS en bifrèquence est appliqué, la précision et l'exactitude du positionnement sont améliorées de plusieurs décimètres. Cela est significatif par rapport à la précision des codes dans ce milieu.

Comme dans l'environnement précédent, l'apport de la deuxième fréquence dans le calcul du positionnement relatif dégrade la qualité des positions de l'ordre de la précision des phases.

Dans le jardin de Neupré, les positions obtenues en appliquant le DGNSS en bifréquence sont plus précises d'un à deux mètres. Les exactitudes varient de quelques décimètres. Ces valeurs ne sont pas significatives au vu de la précision des codes qui est décimétrique dans cet environnement.

La précision des résultats du positionnement relatif en bifréquence est améliorée de quelques décimètres. La différence d'exactitude en North et en Up est métrique. Cette amélioration est significative.

Ces précisions et exactitudes n'étant estimées que sur une période de récolte de données d'une heure, les résultats ne sont pas nécessairement représentatifs.

L'influence de l'apport de la deuxième fréquence dépend de l'environnement, de l'observable et du positionnement effectué. Il ne permet pas systématiquement d'obtenir un gain significatif en termes de précision et d'exactitude.

L'effet du bifréquence est lié à la manière dont le logiciel RTKLib exploite ces fréquences.

Conclusion de la qualité du positionnement avec les données brutes

La qualité des positions obtenues à partir des données brutes du Xiaomi Mi 8 dépend de plusieurs éléments.

Tout d'abord, les précisions et les exactitudes obtenues sont corrélées à la qualité du récepteur. Ainsi, les résultats obtenus par les récepteurs géodésiques sont plus précis et plus exacts que ceux obtenus avec les données brutes du Xiaomi Mi 8.

Ensuite, la qualité du positionnement dépend également de l'environnement dans lequel les données sont récoltées. La cage de Faraday est l'environnement permettant l'obtention des positions de meilleure qualité. Cela résulte en partie du fait que les signaux reçus dans la cage sont préalablement passés par une antenne géodésique filtrant une partie du multitrajet.

Après, la technique de positionnement utilisée influence la précision et l'exactitude des positions. En effet, les calculs de positionnement ne se basent pas tous sur la même observable de base. De plus, les techniques ne gèrent pas les sources d'erreurs de la même manière.

Enfin, la possibilité d'effectuer du positionnement en utilisant deux fréquences ne permet pas d'obtenir des positions d'une qualité significativement meilleure. La précision des positions est souvent améliorée de l'ordre de la précision des observables concernées. Cela est lié à l'utilisation du logiciel RTKLib dont les limitations sont décrites dans la partie 7.6. Si un logiciel exploitant les fréquences L5/E5 de manière plus approfondie avait été testé, l'influence du bifréquence aurait pu être différente.

Tous ces éléments se combinent permettant d'obtenir des positions de plus ou moins bonne qualité.

7.5 Comparaison du positionnement interne et du positionnement avec les données brutes

L'intérêt de l'accès aux données brutes est montré en comparant la qualité des positions internes du Xiaomi Mi 8 et des positions calculées à partir des données brutes du Xiaomi Mi 8.

La position interne ayant la meilleure précision et la meilleure exactitude est celle obtenue sur le toit du bâtiment B5a. Les précisions varient d'1 à 5 mètres. L'exactitude vaut 5 mètres en North, un demi-mètre en East et 4 mètres en Up.

Les positions calculées à partir des données brutes ayant la meilleure qualité sont celles obtenues dans la cage de Faraday en appliquant le positionnement relatif avec un Xiaomi Mi 8 comme *base station*, en mono ou en bifréquence. Dans ce cas, la précision et l'exactitude sont centimétriques. Les précisions et les exactitudes obtenues sur le toit du bâtiment B5a sont également centimétriques.

L'accès aux données brutes permet, par conséquent, d'appliquer des techniques de calcul améliorant les précisions et les exactitudes des positions d'un ou deux ordres de grandeur.

7.6 Limitations

Détermination de la qualité des observables

La méthode utilisée pour déterminer la qualité des observables est la formation de doubles différences de codes et de phases sur courte ligne de base pour en déduire grâce à la loi de propagation des erreurs les précisions des codes et des phases.

Lors de la mise au point de cette méthode, il a été décidé d'associer le multitrajet présent dans les doubles différences au bruit contenu dans les observables. Ce choix rend les qualités des observables obtenues dépendantes du lieu et de la période où les expériences sont réalisées. Dans le cadre de ce mémoire, cela n'a pas d'impact étant donné que ce sont les mêmes données qui ont été utilisées pour déterminer la qualité des observables et pour calculer des positions. Le multitrajet contenu dans le bruit est donc bien celui présent dans les positions calculées.

Set-up des expériences

Différentes limitations sont dues aux expériences réalisées.

Tout d'abord, la cage de Faraday utilisée comme premier environnement est une construction manuelle. Elle n'est par conséquent pas parfaitement perméable aux ondes extérieures.

Ensuite, différents biais horizontaux et verticaux sont introduits dans le set-up expérimental placé sur le toit du bâtiment B5a. Ces derniers ont été décrits dans la partie 7.3. Les biais horizontaux sont inévitables étant donné que la localisation de l'antenne dans l'architecture du smartphone n'est pas connue.

Après, les exactitudes du SPP et du positionnement différentiel et relatif avec les récepteurs géodésiques comme *base station* n'ont pas été évaluées dans le contexte environnemental du jardin. En effet, la position des smartphones n'a pas été mesurée.

Enfin, certaines expériences n'ont été réalisées qu'une seule fois. C'est le cas, par exemple, du Samsung S8 dans la cage de Faraday, des Xiaomi Mi 8 avec une orientation antiparallèle dans la cage de Faraday et des smartphones dans le jardin de Neupré. Des observations sont réalisées sur base de ces expériences, mais aucune conclusion générale ne peut réellement être tirée.

Logiciel RTKLib

Bien que l'utilisation du logiciel RTKLib offre plusieurs avantages, ce logiciel présente également un certain nombre de limitations.

Tout d'abord, il est difficile de savoir comment le logiciel intègre dans ses calculs certaines options qu'il offre. De plus, les descriptions de ces options sont parfois succinctes dans le manuel. Des tests par essais erreurs sont alors nécessaires pour déduire les effets des options.

Ensuite, ce logiciel a d'abord été conçu pour calculer des positions avec les fréquences L1 et L2 de GPS. Il a ensuite dû intégrer les satellites Galileo avec ses fréquences et la fréquence L5 de GPS. Actuellement, tous les satellites n'émettent pas la fréquence L5, contrairement aux fréquences L1 et L2. Les calculs que le logiciel réalise sont, logiquement, optimisés sur les deux premières fréquences L1 et L2.

Le logiciel exploite la fréquence L5/E5 uniquement pour augmenter le nombre d'observables dans la résolution des positionnements. Il utilise également les fréquences E1-E5 de Galileo pour réaliser des combinaisons d'observables permettant d'éliminer l'effet de l'ionosphère. Il utilise L1-L2 pour la constellation GPS.

Enfin, le logiciel n'a pas été créé pour déterminer la position de smartphones. En effet, le comportement des observables provenant du récepteur d'un smartphone est différent de celui des récepteurs géodésiques. Les observables des codes sont beaucoup moins précises dans le cas des smartphones. De plus, les sauts de cycles dans l'observable des phases sont plus nombreux.

8. Conclusion et perspectives

8.1 Conclusion

L'objectif de ce mémoire était de déterminer le gain en précision et en exactitude lié à l'accès aux données brutes et à l'utilisation d'une puce GNSS bifréquence dans un smartphone placé dans différents environnements. Le smartphone utilisé pour ce mémoire est le Xiaomi Mi 8.

Les hypothèses formulées concernent la qualité des observables et la qualité du positionnement.

La méthode employée afin de répondre à la question de recherche a été de définir trois environnements dans lesquels les smartphones sont disposés afin de récolter des données. La qualité des observables est ensuite calculée en réalisant des doubles différences sur les codes et les phases. Les positions des smartphones sont calculées grâce à trois techniques de positionnement : le SPP, le DGNSS et le positionnement relatif. Ces résultats sont analysés afin d'estimer le gain en précision et en exactitude lié à l'accès aux données brutes et à la présence d'une puce GNSS bifréquence.

Les résultats obtenus amènent à plusieurs conclusions permettant de valider ou d'invalider les hypothèses de recherche.

Premièrement, la précision des observables des récepteurs du Xiaomi Mi8 est moins bonne par rapport à celle obtenue avec un récepteur géodésique. Elle diffère d'un ordre de grandeur. La qualité des codes est davantage dépendante du contexte environnemental et de la fréquence du signal que celle des phases. Selon les informations fournies dans la littérature (Riley *et al.*, 2018 ; Gogoi *et al.*, 2019), les observables, essentiellement les codes, sont significativement plus précises en utilisant un smartphone de nouvelle génération. En effet, les codes de la fréquence L1/E1 provenant du Xiaomi Mi 8 sont d'un ordre de grandeur plus précis.

Deuxièmement, le positionnement interne réalisé par le Xiaomi Mi 8 est plus précis et plus exact que celui effectué par le Samsung S8. Bien que les techniques utilisées par les récepteurs des smartphones pour calculer leur position ne sont pas connues, il est possible de supposer que cette amélioration est due à l'utilisation d'autres capteurs et à la possibilité d'exploiter la deuxième fréquence L5/E5. Les précisions et les exactitudes obtenues sont métriques.

Troisièmement, l'accès aux données brutes des récepteurs des smartphones permet d'appliquer des techniques de positionnement menant à des précisions et des exactitudes centimétriques. La technique permettant d'obtenir la meilleure qualité est dépendante de l'environnement.

Le positionnement avec les données brutes est plus précis et plus exact d'un à deux ordres de grandeur par rapport au positionnement interne.

Quatrièmement, les résultats mono et bifréquence issus du logiciel RTKLib ne présentent généralement pas de différence significative. Même si l'apport de la seconde fréquence permet d'améliorer ponctuellement la qualité, elle peut également la dégrader dans certains cas. L'accès à la seconde fréquence L5/E5 semble essentiellement permettre d'améliorer la qualité des codes.

Suite à ces résultats, la première hypothèse concernant la qualité des observables est vérifiée. Les codes sont significativement plus précis avec le Xiaomi Mi 8. De plus, les codes sur la fréquence L5/E5 sont plus précis que ceux obtenus sur la fréquence L1/E1. La qualité des phases est similaire d'une génération de smartphone à une autre. Ce gain en précision des codes explique en partie la qualité du positionnement interne du Xiaomi Mi 8.

La deuxième hypothèse concernant la qualité du positionnement n'est pas vérifiée. En effet, les résultats obtenus en bifréquence ne sont pas significativement plus précis et exacts. Cependant, une précision et une exactitude centimétrique sont atteignables grâce au positionnement utilisant les données brutes du récepteur du Xiaomi Mi 8.

Ces résultats sont soumis à plusieurs limitations, dont l'utilisation du logiciel RTKLib qui n'exploite pas complètement les fréquences L5/E5 et qui n'est pas dédié aux données provenant du récepteur d'un smartphone.

Même si la deuxième hypothèse n'a pas été validée, les évolutions des technologies dans les smartphones, notamment les antennes et les récepteurs GNSS, sont constantes. La qualité des positionnements pourra encore s'améliorer avec une nouvelle génération de smartphones.

8.2 Perspectives

À la suite de ce mémoire, différentes perspectives sont envisageables.

Premièrement, il serait intéressant d'appliquer les techniques de positionnement employées dans ce mémoire en utilisant un autre logiciel de traitement GNSS plus adapté aux données provenant d'un récepteur de smartphone et exploitant davantage les fréquences L5/E5.

Deuxièmement, les expériences réalisées dans le cadre de ce mémoire ne correspondent pas à des situations d'utilisation quotidienne d'un smartphone. Il serait intéressant d'effectuer des tests plus proches de ces scénarios et d'analyser la qualité des observables et l'apport du bifréquence sur des positions calculées à partir des données brutes. Par exemple, afin de simuler des conditions réelles, les smartphones pourraient être placés dans un canyon urbain. Des expériences de positionnement cinématique des smartphones seraient également pertinentes.

Troisième et dernièrement, il serait intéressant d'effectuer les mêmes expériences avec le Huawei Mate 20 Pro et le Xiaomi Mi 9. Cela permettrait d'évaluer les évolutions dans la qualité du calcul interne, de la précision des observables et donc du positionnement avec les données brutes.

9. Bibliographie

- Banville, S., van Diggelen, F. (2016). Precise GNSS for everyone : Precise positioning using raw measurements from Android smartphones. *GPS World*, November 2016, 43-48.
- Benefon (1999). Annual report 1999. Benefon. 32p.
- Broadcom (2017). BCM4775X GNSS Receiver with Integrated Sensor Hub. *Broadcom – Product Brief*. 2p.
- Caizzone, S., Circiu, M.S., Elmaeissi, W., Enneking, C., Felux, M., Yinusa, K.A. (2018). Antenna pattern uniformity effects on pseudorange tracking error. *GPS World*, February 2018, 4p.
- Dabove, P., Di Pietra, V., Lingua, A. M. (2017). Positioning Techniques with Smartphone Technology: Performance and Methodolies in Outdoor and Indoor Scenarios. *INTECH Chapter 8*. 163-183.
- Dabove, P., Di Pietra, V. (2018). Towards high accuracy GNSS real-time positioning with smartphones. *Advances in Space Research*, 63(1), 94-102.
- ESA (n.d.). *galileo*. ESA. https://m.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo/What_is_Galileo. Consulté le 28 mai 2019.
- Garcia, J.G., Mercader, P.I., Muravchik, C.H. (2005). Use of GPS Carrier Phase Double Difference. *Latin American Applied Research*, 35, 115-120.
- Gogoi, N., Minetto, A., Linty, N., Dosis, F. (2019). A Controlled-Environment Quality Assessment of Android GNSS Raw Measurements. *Electronics*, 8(5), 16p.
- GSA (2018). Using GNSS Raw Measurements On Android Devices. *White Paper*, 1, 48p.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Wasle, E. (2008). *GNSS – Global Navigation Satellite Systems : GPS, Glonass, Galileo, and more*. Graz : SpringerWienNewYork, 516p.
- Huawei (2018). Huawei Mate 20 Pro. Huawei. <https://consumer.huawei.com/be-fr/phones/mate20-pro/>. Consulté le 31 mai 2019.
- Humphreys, T. E., Murrian, M., van Diggelen, F., Podshivalov, S., Pesyna, K. M. (2016). On the Feasibility of cm-Accurate Positioning via a Smartphone's Antenna and GNSS Chip. *IEEE/ION PLANS Conference*, April 11-14 2016, Savannah. 11p.
- IGS, RTC Rinex Working Group (2007). RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.11. IGS, 32p.
- IHS Markit (2017). Samsung Galaxy S8 (SM-G950N). HIS Markit Technology. 1p.
- Moernaut, G. J. K., Orban, D. (2009). GNSS Antennas. *GPS World*, February 2009, 42-48.
- NSL's Flamingo Team (2018). Data Quality From the Dual Frequency Xiaomi Mi 8.NSL. <https://www.nsl.eu.com/nsl-jcms/about-nsl/nsl-blog/15-products-and-services/56-xiaomi-mi8-2>. Consulté le 31 mai 2019.
- Pesyna, K. M., Heath, R. W., Humphreys, T. E. (2014). Centimeter Positioning with a Smartphone-Quality GNSS Antenna. *ION GNSS Conference*, September 9-12 2014, Tampa, 10p.
- Resnick, R., Halliday, D. (1979). Loi d'induction électromagnétique. In, John Wiley & Sons, Inc, *Physique 2*. 3^{ème} édition. *Électricité et Magnétisme*. Éditions du renouveau Pédagogique. 206-230.
- Riley, S., Landau, H., Gomez, V., Mishukova, N., Lentz, W., Clare, A. (2018). Positioning with Android GNSS Observables. *GPS World*, 29(1), 18-34.

- Robustelli, U., Baiocchi, V., Pugliano, G. (2019). Assessment of Dual Frequency GNSS Observations from a Xiaomi Mi 8 Android Smartphone and Positioning Performance Analysis. *Electronics*, 8(91), 16p.
- Romero-Andrade, R., Zamora-Maciel, A., Uriarte-Adrian, J.J., Pivot, F., Trejo-Soto, M.E. (2019). Comparative analysis of precise point positioning processing technique with GPS low-cost in different technologies with academic software. *Measurements*, 136, 337-344.
- Sanz Subirana, J., Juan Zornoza, J.M., Hernández-Pajares, M. (2013). *GNSS Data Processing, Volume I : Fundamentals and Algorithms*. Netherlands : Contactivity Bv, 233p.
- Scott, L. (2013). Spoofing. *Inside GNSS*. <https://insidegnss.com/spoofing/>. Consulté le 08 juin 2019.
- Takasu, T., Yasuda, A. (2009). Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open source program package RTKLib. *Symposium on GPS/GNSS*, 6p.
- Takasu, T. (2013). *RTKLib ver. 2.4.2 Manual*. 183p.
- Thuy, M. (2017). *Global Positioning System*. NASA. <https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/policy/GPS.html>. Consulté le 28 mai 2019.
- Trimble (n.d.). *Trimble Centerpoint RTX Post-Processing Service*. <https://www.trimblertx.com/>. Consulté le 08 juin 2019.
- Warnant, R. (2017). Global Navigation Satellite Systems. Cours de master en sciences géographiques, orientation géomatique et géométrologie, à finalité, Liège, Université de Liège, inédit.
- Xiaomi (2018). Mi 8. Mi. <https://www.mi.com/fr/mi8/specs/>. Consulté le 31 mai 2019.
- Xiaomi (2019). Mi 9. Mi. <https://www.mi.com/fr/mi9/specs/>. Consulté le 31 mai 2019.
- Zhang, X., Tao, X., Zhu, X., Wang, F. (2018). Quality assessment of GNSS observations from an Android N smartphone and positioning performance analysis using time-differenced filtering approach. *GPS Solutions*, 22(3), 11 p.

10. Annexes

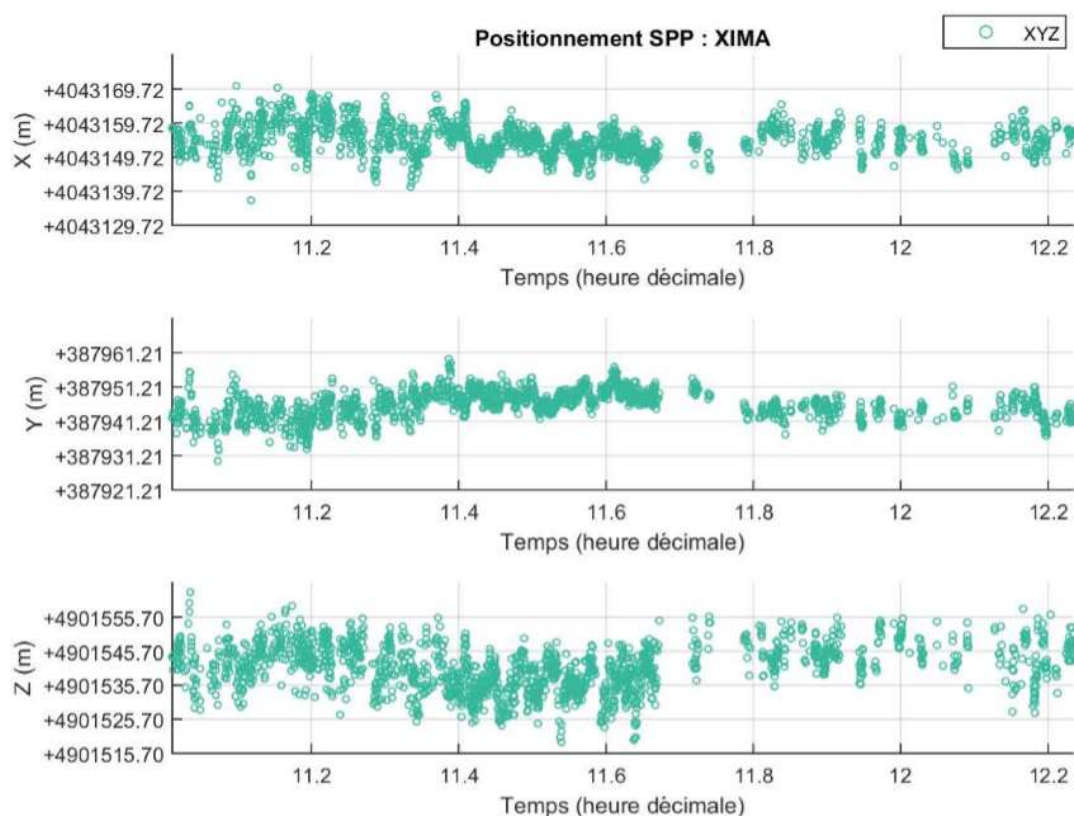
10.1 Annexe 1 : période de récolte de données

Ce tableau représente les jours de l'année où les données ont été récoltées, la durée de l'expérience et le set-up (smartphones concernés et environnement).

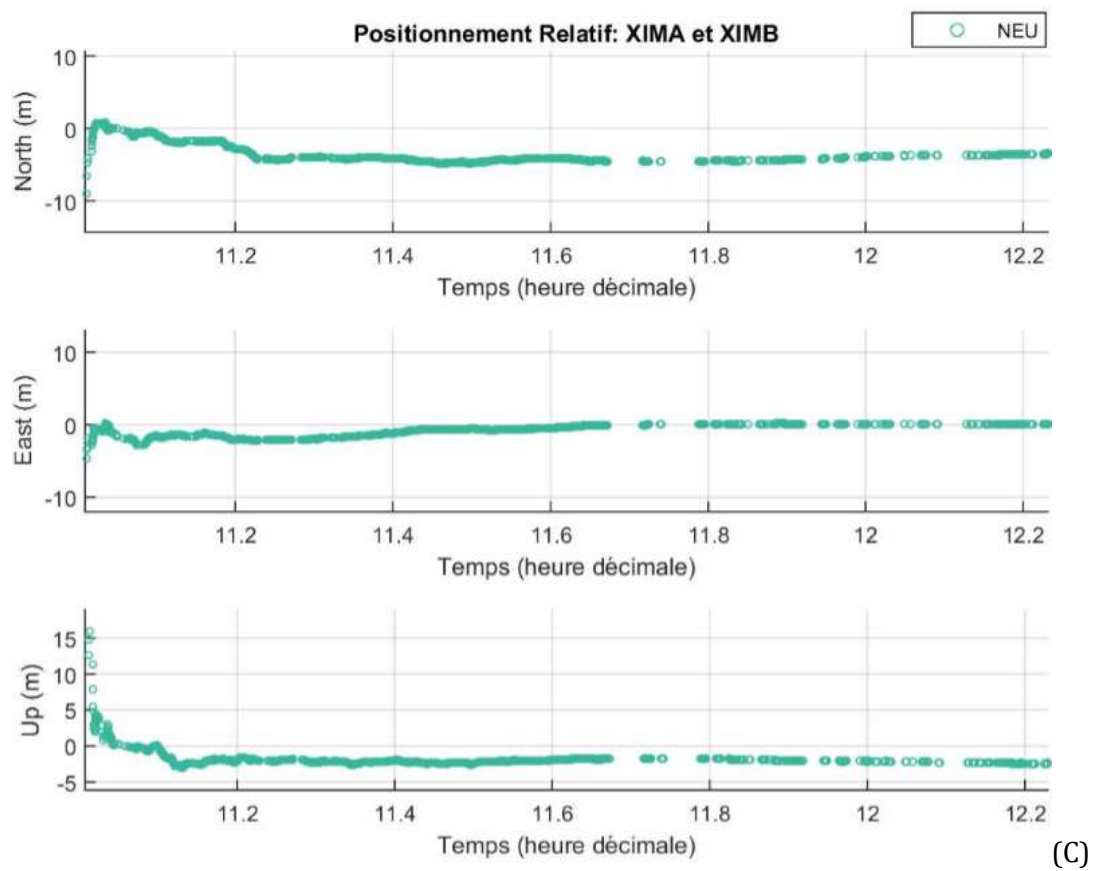
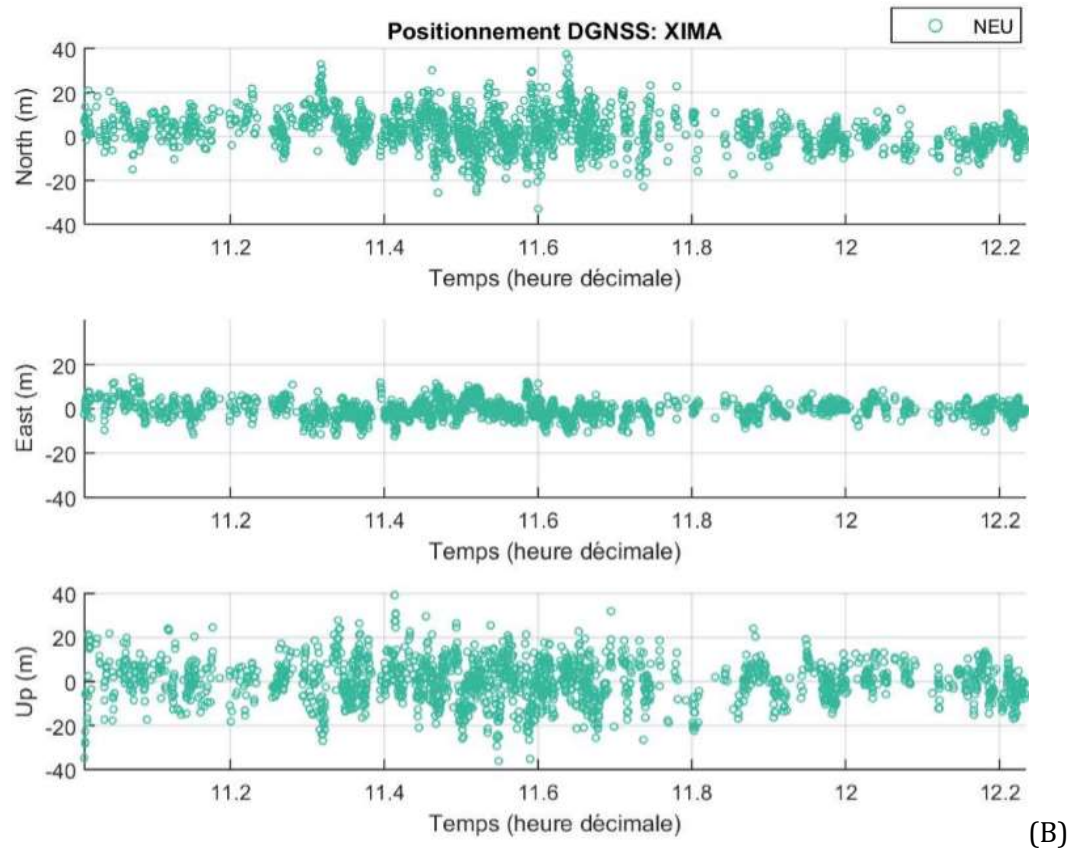
DOY	Date	Durée (h)	Expérience
246k	03-09-18	1	2 Xiaomi Mi 8 en parallèle sur le toit du bâtiment B5a
246m	03-09-18	1	2 Xiaomi Mi 8 en parallèle sur le toit du bâtiment B5a
045j	14-02-19	1	2 Xiaomi Mi 8 et 1 Samsung S8 en parallèle sur le toit du bâtiment B5a
048l	17-02-19	1	2 Xiaomi Mi 8 et 1 Samsung S8 dans un jardin de Neupré
049n	18-02-19	1	2 Xiaomi Mi 8, 1 Samsung S8 et 1 Huawei Mate 20 Pro en parallèle sur le toit du bâtiment B5a
091o	01-04-19	1	1 Xiaomi Mi 8 dans la cage de Faraday (XIMA) et 1 Xiaomi Mi 8 sur le toit du bâtiment B5a (XIMB)
094i	04-04-19	1	2 Xiaomi Mi 8 en parallèle dans la cage de Faraday
094m	04-04-19	2	2 Xiaomi Mi 8 en parallèle dans la cage de Faraday
095g	05-04-19	4	2 Xiaomi Mi 8 en parallèle dans la cage de Faraday
127i	07-05-19	2	2 Xiaomi Mi 8 en antiparallèle dans la cage de Faraday
130m	10-05-19	1	1 Xiaomi Mi 8 et 1 Samsung S8 en parallèle dans la cage de Faraday

10.2 Annexe 2 : Diminution du nombre de positions calculées dans l'environnement du jardin

Ces graphes montrent la diminution du nombre de positions calculées après la 36^{ème} minute au jour 048l dans le jardin de la commune de Neupré. Cette diminution est due aux obstacles présents dans l'environnement empêchant le récepteur de capter assez de signaux. Les différents graphes représentent les différentes techniques de positionnement (SPP(A), DGNSS (B), positionnement relatif (C)).



(A)



10.3 Annexe 3 : Règle empirique de l'influence de la position a priori dans le DGNSS et le positionnement relatif (Warnant, 2017)

La règle empirique suivante :

$$\frac{|\overrightarrow{db_{AB}}|}{|\overrightarrow{b_{AB}}|} = \frac{|\overrightarrow{dR_A}|}{|\overrightarrow{R_A^l}|}$$

Où :

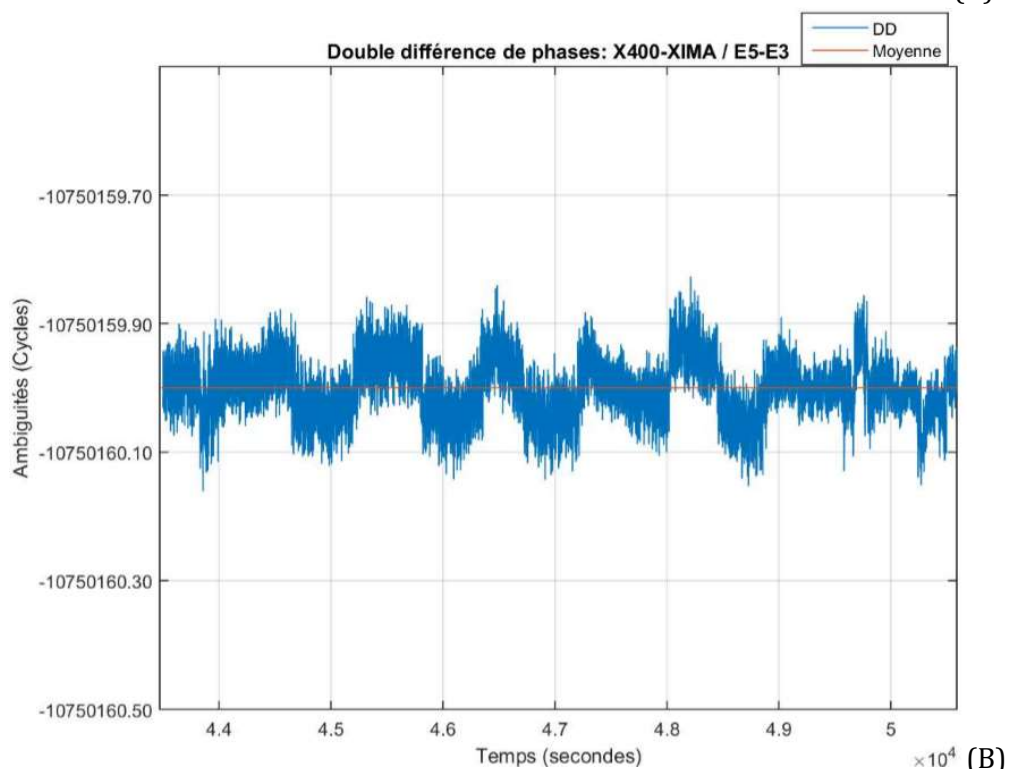
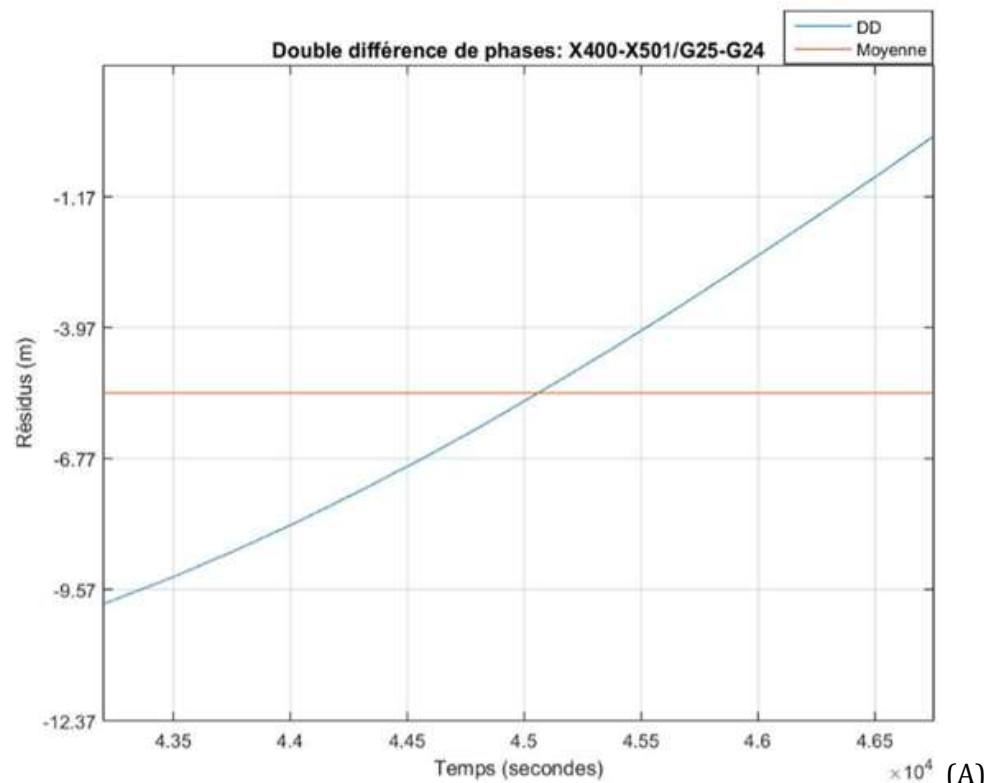
- $|\overrightarrow{db_{AB}}|$ est l'erreur sur la longueur de la ligne de base entre les récepteurs A et B
- $|\overrightarrow{b_{AB}}|$ est la longueur de la ligne de base entre les récepteurs A et B
- $|\overrightarrow{dR_A}|$ est l'erreur de positionnement du récepteur A
- $|\overrightarrow{R_A^l}|$ est la distance entre le satellite et le récepteur A et vaut plus ou moins $2,2 * 10^7$ m

Si la précision souhaitée sur une ligne de base de 1 km est de 0,01 mètre, alors :

$$\frac{0,01}{1000} = \frac{|\overrightarrow{dR_A}|}{2,2 * 10^7}$$
$$|\overrightarrow{dR_A}| \approx 220 \text{ m}$$

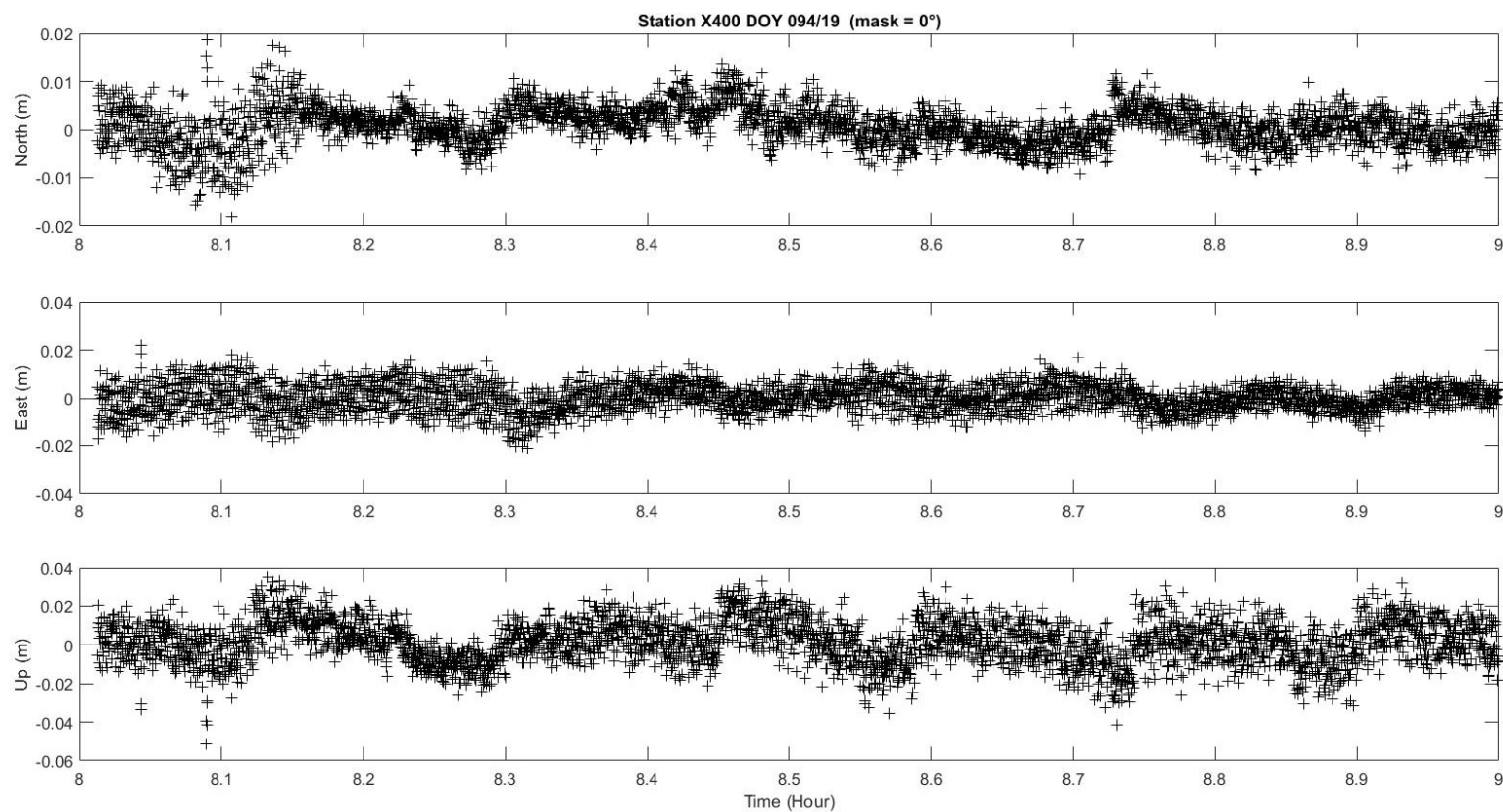
10.4 Annexe 4 : Doubles différences entre récepteurs géodésiques avec 50 cm d'erreur en Y

Le graphe (A) représente des doubles différences de phases sur la fréquence L1 entre deux récepteurs géodésiques, X400 et X501. La position a priori de l'antenne ULG 1 est affectée d'une erreur de 50 cm en Y afin de démontrer la pente liée aux erreurs dans la géométrie. Le graphe (B) représente des doubles différences de phases sur la fréquence L1 entre un récepteur géodésique, X400, et un Xiaomi Mi 8, XIMA, au jour de l'année 094m.



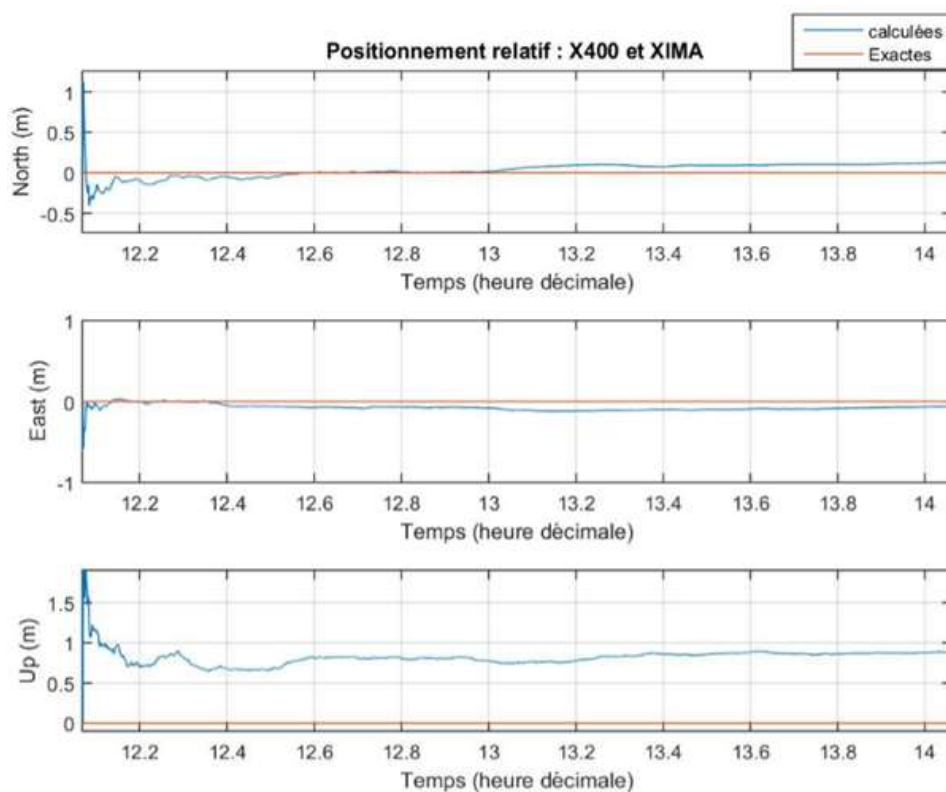
10.5 Annexe 5 : Positionnement relatif entre récepteur géodésique et smartphone avec le logiciel en développement à l'unité de géomatique

Le graphe représente les résultats de la ligne de base obtenus en réalisant du positionnement relatif entre un récepteur géodésique (X400) et un Xiaomi Mi 8 (XIMA) dans la cage de Faraday. Le logiciel utilisé est celui en développement par le professeur R. Warnant au sein de l'unité de géomatique de l'université de Liège. La valeur moyenne des composantes est proche de zéro. Cela confirme l'hypothèse qu'il y a bien une *zero-baseline* entre X400 et XIMA/XIMB.

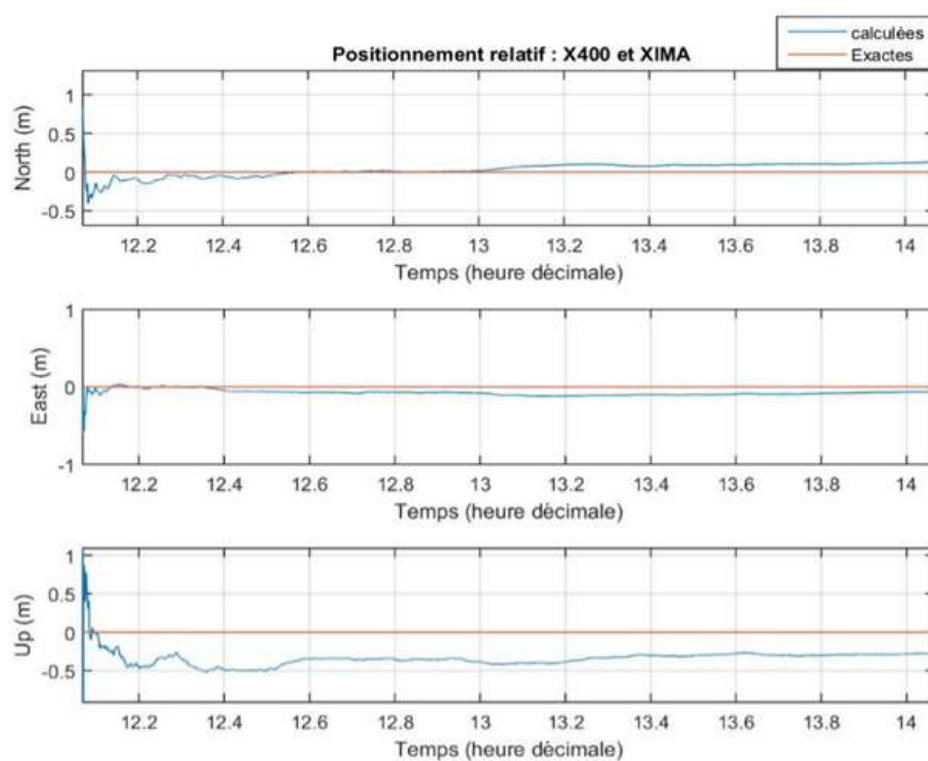


10.6 Annexe 6 : Modification des options d'antennes

Les options des antennes sont modifiées afin de voir l'influence de ce paramètre sur le résultat. Les graphes sont le résultat du positionnement relatif entre un récepteur géodésique, X400, et un Xiaomi Mi 8, XIMA, en bifréquence (A : Pas d'information sur les antennes, B : Type d'antenne précisé).



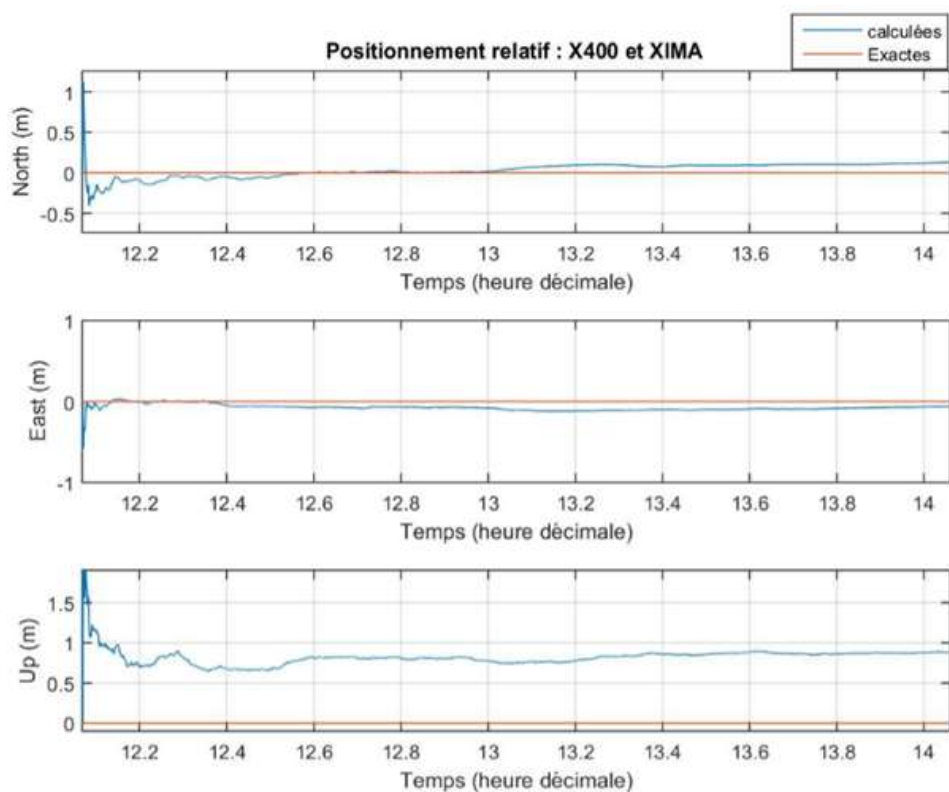
(A)



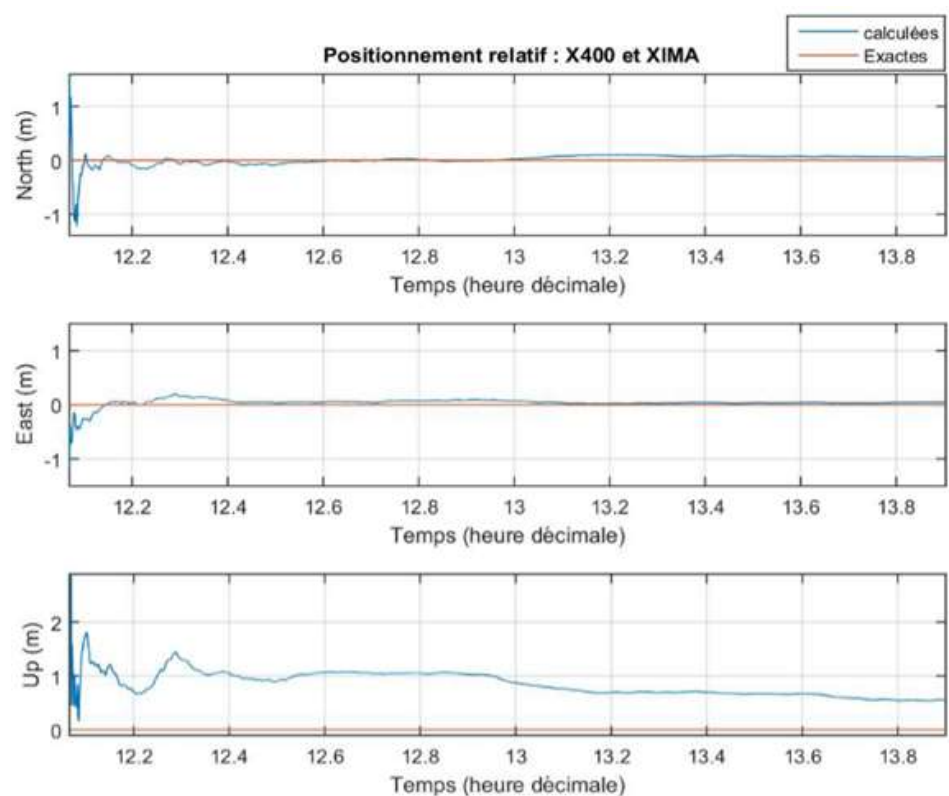
(B)

10.7 Annexe 7 : Modification des options de tolérances

Les options de tolérance de bruit sont modifiées afin de voir l'influence de ce paramètre sur le résultat. Les graphes sont le résultat du positionnement relatif entre un récepteur géodésique, X400, et Xiaomi Mi 8, XIMA, en bifrèquence (A : Valeurs par défaut, B : Valeurs des précisions des observables).



(A)



(B)