HAL
open science

Mise en place d'une méthode de positionnement dynamique des réseaux, accessible via smartphone, répondant aux normes de la DT-Dict

Cyril Perret

To cite this version:

Cyril Perret. Mise en place d'une méthode de positionnement dynamique des réseaux, accessible via smartphone, répondant aux normes de la DT-Dict. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2015. dumas-01339013

HAL Id: dumas-01339013

https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01339013v1

Submitted on 29 Jun 2016

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

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

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS

ÉCOLE SUPÉRIEURE DES GÉOMÈTRES ET TOPOGRAPHES

MÉMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le DIPLÔME D'INGÉNIEUR CNAM

Spécialité : Géomètre et Topographe

par

Cyril PERRET

Mise en place d'une méthode de positionnement dynamique des réseaux, accessible via smartphone, répondant aux normes de la DT-Dict.

Soutenu le 8 juillet 2015

JURY

PRÉSIDENT :	**Monsieur Laurent MOREL**	
MEMBRES :	**Monsieur Alexandre GALLO-BALMA**	**Maître de stage**
	Monsieur Jérôme VERDUN	**Professeur référent**
	Monsieur Jean-Michel FOLLIN	
	Monsieur Olivier FOUCHÉ	
	Monsieur Luc JAULET	
	Madame Nathalie THOMMERET	

Remerciements

Ce mémoire est non seulement le reflet du travail de fin d'études, mais aussi l'aboutissement du cycle d'ingénieur à l'ESGT. Avant de rentrer dans le vif du sujet, il me tient à cœur de mettre en lumière les personnes qui m'ont soutenu tout au long de cette aventure.

Tout d'abord, je tiens à remercier mon maître de stage, Alexandre Gallo-Balma, et Philippe Dantaux, responsable du bureau d'étude, qui m'ont épaulé pendant ces vingt semaines. Leurs générosités traduites par une disponibilité et un partage de leurs expériences m'ont été d'une aide précieuse.

Ensuite, j'adresse mes remerciements les plus chaleureux à Philippe Klinklin, le directeur de l'agence Colas Le Pouzin, sans qui ce projet n'aurait jamais vu le jour. La confiance qu'il m'a accordée est le point de départ de notre collaboration sur ce projet.

Non moins important est l'ensemble des collaborateurs de cette agence Colas qui ont rendu plus agréable mon quotidien. La convivialité est l'une des valeurs qu'ils ont véhiculée pendant ces cinq mois.

Je remercie aussi Jérôme Verdun, mon professeur référent. Malgré la distance, il a trouvé le temps et les mots pour me faire grandir au fils du projet. Son suivi du déroulement de l'étude m'a permis de profiter entre autres de ces conseils et les corrections tout au long de mes avancements. Il m'a aussi orienté vers son collègue José Cali et le thésard Clément Roussel. Je les remercie pour leur accueil et leur aide dans le domaine du traitement du signal.

Enfin, je remercie toutes les personnes non citées qui ont contribué à ce travail de fin d'études. Je vais clôturer ce chapitre en remerciant de tout cœur ma famille qui n'a cessé de m'encourager.

Liste des abréviations

AFNOR : Association Française de NORmalisation.

BTP : Bâtiment et Travaux Publics.

DGPS : Differential Global Positioning System : Système de positionnement mondial différentiel (amélioré).

Dict : Déclaration d'intention de commencement de travaux.

DT : Déclaration de travaux.

GNSS : Global Navigation Satellite System : Système de navigation par satellite.

GPS : Global Positioning System : Système de positionnement mondial.

IGN : Institut national de l'information géographique et forestière.

INS : Inertial Navigation System : Navigation inertielle.

MEMS : Micro Electro-Mechanical Systems : Microsystème électromécanique.

Glossaire

A-GPS : Composant intégré dans un smartphone avec pour vocation le positionnement par technologie GPS assisté par des données externes. Le plus souvent, ces dernières sont : le réseau cellulaire, des informations sur les éphémérides provenant d'internet, le temps.

Accéléromètre : Capteur permettant de mesurer la valeur de l'accélération.

Gyromètre : Capteur permettant de mesurer la valeur de la vitesse angulaire.

.Kml : Keyhole Markup Language : Langage à base de balises géolocales. Les fichiers compatibles sous Google Earth ont l'extension .Kml.

Le réseau TERIA : C'est un service proposant des corrections GNSS en temps réel pour obtenir une précision inférieure à 5cm.

Magnétomètre : Capteur permettant de mesurer la valeur du champ magnétique.

Mesure de pseudo-distance : Elle correspond à la mesure indirecte d'une distance par l'intermédiaire du temps de parcours du signal. En GPS, cela correspond aux temps entre le satellite et le récepteur, donc à la distance satellite-récepteur.

NMEA : La trame NMEA (National Marine & Electronics Association) est un protocole de transmission des données entre les instruments et les équipements utilisant le GNSS.

Temps de Fix : C'est le temps afin que la puce A-GPS combine les différentes techniques pour déterminer la position. Il peut être renouvelé en cours d'utilisation suivant les constellations, les éphémérides et autres paramètres évoluant avec le temps.

.txt : C'est l'extension de fichier texte.

WGS84 : Il définit un système de coordonnées mondial support de base du système GPS.

Table des matières

Remerciements 2

Liste des abréviations 3

Glossaire 4

Table des matières 5

Introduction 7

I PRINCIPE DE BASE ET NOTIONS MATHEMATIQUES 9

I.1 LES DIFFERENTS REPERES 9

I.1.1 Le repère géographique 9

I.1.2 Le repère de calculs 9

I.1.3 Le repère « body » 9

I.2 PRINCIPE DE LA NAVIGATION INERTIELLE 10

I.3 PRINCIPE DU POSITIONNEMENT GNSS 10

I.4 LES OBLIGATIONS DE LA LEGISLATION FRANÇAISE 10

I.5 LES NOTIONS MATHEMATIQUES 11

I.5.1 Le filtre de Kalman 11

I.5.1.1 Une étape de prédiction 12

I.5.1.2 Une étape de correction 12

I.5.2 Le bruit blanc gaussien 13

I.5.3 La variance d'Allan 13

I.5.4 Changement de repère : géographique WGS84 en projection Lambert 93 avec l'altitude NGF/IGN69 14

II ANALYSE DES COMPOSANTS POUR LE POSITIONNEMENT 15

II.1 LA PUCE GNSS 15

II.1.1 Rappel sur le positionnement 15

II.1.2 La solution de positionnement des smartphones 15

II.1.3 Tests et analyses sur le smartphone Sony Xpéria Z1 compact 16

II.1.3.1 Première acquisition de données 16

II.1.3.2 Tests sur des temps plus courts et en mouvement 19

II.1.3.3 Comparaison avec un GPS utilisant le réseau TERIA 19

II.1.4 Bilan du positionnement par la puce GNSS 20

II.2 LE SYSTEME INERTIEL 21

II.2.1 La puce de l'accéléromètre 21

II.2.2 La puce du gyromètre 21

II.2.3 La puce du magnétomètre 22

II.2.4 Les valeurs calculées par le système 22

II.2.5 La navigation par système inertiel 22

II.2.6 La calibration et détermination du bruit de mesure 23

II.2.6.1 Bruit de mesure : Variance d'Allan 23

II.2.7 Bilan du système inertiel 25

III HYBRIDATION GNSS/CENTRALE INERTIELLE 26

III.1 POURQUOI COUPLER UN SYSTEME INERTIEL AVEC UN POSITIONNEMENT GNSS ? 26

III.2 LES METHODES D'HYBRIDATION 27

III.2.1 L'hybridation lâche 27

III.2.2 L'hybridation serrée 27

III.2.3 L'hybridation très serrée ... 28
III.2.4 La méthode la plus adaptée aux smartphones ... 28
III.3 LES CHANGEMENTS DE REPERE ... 29
III.3.1 Repère géographique vers le repère Calculs ... 29
III.3.2 Repère « Body » vers le repère Calculs ... 29
III.4 UNE MULTITUDE DE DONNEES, QUELLE SOLUTION ? ... 29
III.4.1 Le GPS au service du positionnement INS ... 30
III.4.2 La correction de l'accélération par la distance d'un pas ... 30
III.4.3 Le GPS assisté par la biomécanique ... 31
IV INNOVATION APPORTEE ... 33
IV.1 LE COUPLAGE GPS/BIOMECANIQUE ... 33
IV.1.1 Préparatif des données ... 33
IV.1.1.1 Les informations des trames NMEA ... 33
IV.1.1.2 La détermination des coordonnées issues de la biomécanique ... 33
IV.1.2 Le vecteur d'état associé ... 34
IV.1.3 Le modèle d'évolution du système ... 34
IV.1.4 Le modèle d'observation ... 35
IV.2 LES RESULTATS ATTENDUS ... 36
V EXPERIMENTATION DU PROTOCOLE ... 37
V.1 PRESENTATION DU TEST ... 37
V.2 LES CALIBRATIONS ... 39
V.2.1 Les composants : l'accéléromètre, le gyroscope et le magnétomètre ... 39
V.2.2 La longueur du pas ... 40
V.3 LA METHODE DE LEVER ... 40
VI RESULTATS ET ANALYSES ... 42
VI.1 LES DONNEES BRUTES ... 42
VI.2 LES RESULTATS PRELIMINAIRES ... 43
VI.2.1 Géoréférencement GNSS ... 43
VI.2.2 Positionnement issu de la biomécanique ... 43
VI.2.3 Conclusion ... 44
VI.3 RESULTAT DU GPS/BIOMECANIQUE ... 44
VI.4 UNE EVOLUTION MATERIELLE POUR LA COMPOSANTE ALTIMETRIQUE ... 47
VI.5 EN RESUME ... 48
VII PERSPECTIVES ... 49
Conclusion ... 50
Bibliographie ... 52
Table des annexes ... 54
Annexe 1 Transformation coordonnées géographiques vers planes Lambert 93 ... 55
Annexe 2 Transformation du repère ITRF2008 à ETRF2000 ... 56
Annexe 3 Esquisse des principales fonctionnalités de l'application ... 57
Annexe 4 Résumé ... 58
Annexe 5 Poster de présentation du TFE ... 62
Liste des figures ... 63
Liste des tableaux ... 64

Introduction

À l'heure où les moyens de communication ne cessent de s'accroître, le smartphone est l'un des outils devenu indispensable dans le quotidien de notre société. La puissance de cette technologie permet à la fois de jouer à des jeux, de regarder des vidéos, mais également de surfer sur internet, ou de lire ses messages électroniques. Le smartphone de par sa connectivité est aujourd'hui un outil de productivité dans le monde professionnel. Il permet aussi de faciliter le quotidien notamment avec des millions d'applications telles que le GPS, l'appareil photo. Le monde d'aujourd'hui a un besoin de tout savoir et très vite. Ce dynamisme est aussi propulsé non seulement par l'État avec le soutien au développement des infrastructures de communication (fibre optique), mais aussi par la loi avec entre autres l'obligation de géoréférencer tous les travaux sur son territoire. En effet, la méconnaissance de la position des millions de kilomètres de réseaux en France est une épée de Damoclès pour les nouveaux travaux. À la suite de certaines catastrophes, une réforme importante est née en 2012 avec les Déclaration de Travaux et Déclaration d'intention de commencement de travaux (DT-Dict). Il en découle non seulement une création d'un guichet unique qui recense tous les réseaux, mais aussi une obligation de les géoréférencer suivant des classes de précisions (40 cm pour la plus précise). Cette dualité entre la connaissance et la communication a aujourd'hui fait naître des Systèmes d'Information Géographique (S.I.G.). Les géomètres, ingénieurs du développement ou même le monde du BTP sont donc des acteurs majeurs dans cette nouvelle sphère.

Présent dans toutes les activités d'aménagement, le groupe COLAS, en tant que le leader mondial de la construction de routes est l'un de ces acteurs. De ce fait, les obligations de ces dernières années leur sont directement destinées. Toutefois, dans un climat économique difficile, l'investissement dans des dispositifs coûteux n'est pas envisageable. Le besoin de localiser rapidement des éléments sur les chantiers et de communiquer les informations, le tout à moindre frais, est devenu une nécessité. Le partage de ces besoins de l'agence Colas du Pouzin (Ardèche) à mon égard est la base d'une discussion autour d'un projet apportant une solution technique à ce problème de positionnement. Un tour d'horizon des moyens déjà mis en œuvre sur les chantiers et des solutions bas coût disponibles sur le marché est une étape importante. Nous avons aussi classé les travaux à effectuer en deux catégories : ceux réalisables en tranchée ouverte, où l'on a accès directement aux réseaux et ceux qui peuvent être effectués seulement à la fin des travaux, donc sans visualisation directe.

Tout d'abord, nous avons vite éliminé la deuxième qui nécessite l'achat de matériel assez coûteux, dont les précisions sont encore aujourd'hui insuffisantes [3]. Concernant le travail en tranchée ouverte, plusieurs solutions sont disponibles. La technique de positionnement par satellite utilisant les mesures de différences de phase est une évidence aujourd'hui pour localiser les réseaux. Plusieurs techniques sont possibles, soit celles qui utilisent deux appareils, soit un service extérieur de type Teria, Orphéon ou autre, qui permet le temps réel. Or, le travail en tranchée ouverte impose un temps de lever rapide, ne retardant pas l'avancement des travaux. Ensuite, il faut des interventions régulières sur tous les chantiers, donc une mobilisation de personnel compétent en topographie équipé de systèmes de positionnement. La conséquence est un coût de mis en place trop élevé ou pas assez rapide. L'idée d'utiliser des récepteurs GPS de « randonnée » avec des prix bien

moindres a donc tout naturellement émergé. Le problème est que cette technique de localisation qui utilise la pseudo-distance est métrique, donc non compatible avec les classes de précision de la DT-Dict.

Dans le monde du positionnement, il existe un autre système de positionnement dit inertiel. Ce dernier est largement répandu dans l'aéronautique, mais son prix est disproportionné dans le cadre de travaux topographiques.
Toutefois, au cours de ce siècle, l'avènement du tout numérique a permis de concevoir des composants bas coût de moindre qualité. La technique employée est nommée MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems). Certes, le prix est abordable, mais l'utilisation ne permet pas de rentrer dans les tolérances du positionnement requis. Ces capteurs ne cessent de progresser au fil des années et de nombreux travaux ont vu le jour. Des instituts comme l'IFSTAR se sont même spécialisés dans des solutions de géolocalisation en intérieur basé sur cette technologie. Une nouvelle méthode de travail est venue en parallèle, le positionnement dynamique. Cette technique consiste en l'estimation de paramètres cinématiques de systèmes mobiles afin d'estimer la position d'un mobile. Le mélange des capteurs MEMS avec ce processus fait appel à une méthode en temps réel ou différé : le filtre de Kalman [11]. De nombreux travaux à l'instar de [4], [14], [13] utilisant ces outils permettent par exemple de positionner un piéton en intérieur à quelques mètres près. Dans une autre approche, le TFE de Vincent DEMEULE [5] montre que l'utilisation des capteurs MEMS d'un smartphone combinée à des mesures GPS permet d'estimer le déplacement d'un piéton. Les résultats sont encourageants. De plus, aujourd'hui des recherches [1], [7], [15] montrent des traitements supplémentaires mis en place pour améliorer les données issues de ces composants.

La réflexion du bureau d'étude de l'agence se dirige tout logiquement vers une solution originale du smartphone pour géoréférencer rapidement, précisément et de façon peu onéreuse les réseaux enterrés. En effet, ce condensé de technologie présenté au début de l'introduction rassemble entre autres une centrale inertielle, une puce GNSS et un calculateur. La possibilité de se déplacer avec lui permet théoriquement un positionnement rapide et dynamique parfaitement envisageable en tranchée ouverte.

C'est au cœur du BTP entouré par le développement du numérique que ce travail de fin d'études cherche à établir une solution de géoréférencement dynamique par smartphone pour répondre aux exigences de la DT-Dict. Les enjeux sont multiples :

- la combinaison de données issue du système inertiel MEMS avec celle du GNSS pour un positionnement dynamique à moins de 40 cm ;
- la définition d'une méthodologie permettant la certification du personnel utilisateur ;
- l'implémentation d'une application de géoréférencement dans un smartphone.

Ce rapport s'articule en six parties. Tout d'abord, nous présenterons les principes de base puis les caractéristiques des différents capteurs qui déboucheront sur les différentes techniques d'hybridation utilisant des filtres de Kalman. Nous poursuivrons sur les nouvelles techniques de géoréférencement intégrées sur smartphone qui seront expérimentées par la suite sur un protocole comportant un réseau. Ensuite, une partie sera consacrée à l'analyse des résultats. Enfin, nous énumérerons quelques pistes d'améliorations de la solution.

I Principe de base et notions mathématiques

Le positionnement dynamique requiert certes la mise en œuvre de divers capteurs, mais repose surtout sur leurs possibles associations pour permettre une meilleure qualité dans les résultats. Dans cette partie, nous introduirons des notations, des concepts, et des outils de base utilisés par la suite.

I.1 Les différents repères

Avant de se lancer dans les théorèmes et autres calculs, il est nécessaire de savoir dans quel référentiel on se situe.

I.1.1 Le repère géographique

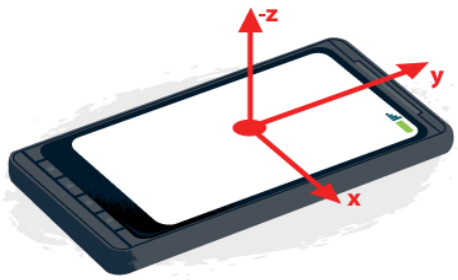
Il consiste en un trièdre orthogonal lié à la terre. Son centre est fixé au centre de masse de la Terre. L'axe Z est confondu avec l'axe moyen de rotation de la Terre et dirigé vers le pôle Nord. L'axe X est défini par l'intersection entre le plan du méridien de Greenwich et du plan équatorial. Enfin, l'axe Y complète le trièdre pour former un repère orthogonal direct.
Dans ce référentiel, nous pouvons exprimer les coordonnées géographiques (latitude, longitude, hauteur) en WGS 84 en utilisant l'ellipsoïde de même nom.

I.1.2 Le repère de calculs

Le référentiel de calculs est une projection liée à un système de coordonnées légal de géoréférencement. Le plan E-N est tangent à l'ellipsoïde. Les axes n et e sont dirigés respectivement vers le Nord géographique et vers l'Est. L'axe h est suivant la normale au plan E-N orienté vers le haut. Ce repère 2D + 1 permet de relier les données de la centrale inertielle aux données GNSS tout en respectant les obligations législatives. Dans notre étude, ce repère sera le Lambert 93[1] associé au RGF93[2] et au NGF/IGN69[3] pour la composante verticale.

I.1.3 Le repère « body »

Ce trièdre direct est centré sur le capteur et orienté suivant ses axes sensibles.



Sur un grand nombre de mobiles, l'axe des x est suivant la base du smartphone, l'axe y est suivant la longueur et enfin l'axe z est perpendiculaire au plan de l'écran. Sur le schéma de la **Figure 1** est illustré ce repère pour le Sony Xpéria Z1 compact.

Figure 1 : Image schématisant un smartphone avec les axes de la centrale inertielle (source : developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/Guide/Events/Orientation_and_motion_data_explained)

---

[1] *Le Lambert 93 est le système de projection français de référence.*
[2] *RGF93 est le système de référence français comparable avec le WGS84. L'ellipsoïde associé, l'IAG GRS 1980, présente un écart de 0.00001m sur le demi-petit axe b avec celui du WGS84*
[3] *NGF/IGN69 : Le Nivellement Générale de la France déterminé par l'IGN en 1969 est le système légale en France métropolitaine avec le niveau zéro déterminé par le marégraphe de Marseille*

D'après les informations du constructeur, et l'analyse effectuée à partir du site internet [19], on ne peut pas déterminer le centre exact de ce repère. Cependant il semblerait que le gyromètre et l'accéléromètre soient situés dans la partie supérieure de l'écran et le magnétomètre dans la partie inférieure. Seuls, des étalonnages pourraient définir ces centres plus précisément.

I.2 Principe de la navigation inertielle

Les systèmes de navigation inertielle se composent de trois accéléromètres, de trois gyromètres uniaxes pour permettre le calcul de la position, la vitesse et l'attitude. Dans certains cas, un magnétomètre est utilisé en complément pour obtenir un azimut. Les grandeurs utilisées pour cette détermination sont des mesures d'accélérations et des vitesses angulaires. Le positionnement est relatif, c'est-à-dire que la navigation se fait à partir d'un point initial connu. Ce principe fait partie de la famille de navigation à l'estime (DR : Dead Reckoning). Cette technique ne date pas d'aujourd'hui, mais le développement des capteurs MEMS a permis leurs utilisations dans un grand nombre de produits. Les smartphones se sont vus implémenter ces types de capteurs, mais seulement dans leurs versions bas coût.
De ce fait, leurs exploitations doivent être faites avec précaution en évitant les intégrations numériques, source d'instabilités. Le magnétomètre est plus un outil supplémentaire permettant de réduire les erreurs des deux autres, mais aussi de déterminer un azimut. Afin de réduire au maximum les erreurs de biais et de dérives au cours du temps, il est couramment utilisé d'autres systèmes tels que le positionnement GNSS.

I.3 Principe du positionnement GNSS

Le principe repose sur une localisation à l'aide de satellite via un récepteur. Cette idée est le fruit de l'armée américaine dans les années 70 avec le système GPS. La technique de base est la triangulation à l'aide de signaux émis par les satellites à un récepteur spécifique. En connaissant la position des émetteurs et la fréquence du signal, on peut calculer à l'aide du temps de trajet de l'onde (la pseudo-distance), la distance récepteur satellite. En pratique, le problème est plus complexe avec la modulation des fréquences, l'utilisation de phase, et surtout des problèmes liés à des perturbations du signal pendant son trajet.
Depuis, d'autres pays comme la Russie, la Chine, et l'Europe ont développé leur propre système de radio positionnement par satellite. L'utilisation de l'ensemble des constellations est appelée le positionnement GNSS. Aujourd'hui, la précision de positionnement est comprise entre 25 m dans le cas le plus simple à 1 cm dans ces élaborations les plus abouties [8].

I.4 Les obligations de la législation Française

Les réformes et décrets à partir de décembre 2010 ont mis en place des obligations concernant les réseaux avec notamment les DT-Dict entrées en vigueur sous la réforme anti-endommagement le 1er juillet 2012. Pour plus d'information se référer aux normes AFNOR NF S70-003 et aux travaux de [9]. La mesure phare qui se dégage de cette nouvelle législation à la base de ce travail est l'obligation de géoréférencer tous les réseaux qu'ils soient créés ou seulement modifiés. La connaissance de la position est tolérée avec un écart de 40 cm suivant les trois axes

pour la classe la plus précise. Le respect des tolérances est défini par l'arrêté du 16 septembre 2003 portant sur les classes de précision.
Un autre point important qui vient se rajouter à cette exigence est la certification du personnel. À ce sujet, l'entreprise compétente est celle qui réalise les travaux ; il y a un besoin de formation du personnel réalisant l'opération pour s'assurer d'un résultat conforme.

I.5 Les notions mathématiques

Dans cette sous-partie, nous introduirons le filtre de Kalman, un outil mathématique très répandu dans le traitement de données dynamiques bruitées et les changements de repère.

I.5.1 Le filtre de Kalman

La solution finale de positionnement est le résultat d'une hybridation des différentes données à l'aide d'un filtre de Kalman. Une vue globale de cet outil mathématique avec la définition des notations employées dans cette section permet de bien comprendre les différentes étapes de cette étude.
L'intérêt du filtre de Kalman est d'estimer un ou des paramètres qui varient dans le temps à partir de mesures bruitées et de modèle d'évolution temporelle incluant les incertitudes. Pour ce faire, il a une capacité de prédiction des paramètres, mais surtout de rectification des erreurs liées aux mesures et au modèle.
Comparé à la méthode classique des moindres carrés, le filtre de Kalman prend en compte la modélisation dynamique du système en relation avec les observations. Dans son fonctionnement, le principe de base repose sur deux étapes :

-la phase de prédiction de l'estimation selon le modèle du système ;

-la phase de correction de l'état estimé en utilisant les observations.

Ces étapes sont mises à jour à chaque instant, puis sont répétées tout au long du phénomène étudié.

Afin de pouvoir utiliser cet outil, il faut un problème linéaire, où s'en ramener, afin de toujours être en présence des bruits de mesure de type bruit blanc gaussien centré. Le filtre de Kalman est constitué d'un vecteur d'état dont les composantes sont les inconnues. Il est indispensable que ce dernier à l'instant t dépende du vecteur d'état à l'instant précédent. Cette relation se traduit par l'équation :

$$x_k = A_{k-1} \times x_{k-1} + W_{k-1} \qquad (1)$$

où x_k est le vecteur d'état du système à l'instant t_k ;

A_{k-1} est la matrice de transition entre les époques t_{k-1} et t_k. Elle est considérée invariable dans le temps ;

W_{k-1} est le bruit du modèle à l'instant t_{k-1}, supposé blanc, gaussien, de moyenne nulle et de matrice de covariance Q_{k-1}.

Les observations liées aux inconnues à l'instant t_k sont présentes sous la forme :

$$Z_k = H_k \times x_k + N_k \qquad (2)$$

avec Z_k comme vecteur des observations t_k ;
N_k représentant le bruit de mesure à l'instant t_k. Ici aussi ce bruit est un bruit blanc gaussien.

I.5.1.1 Une étape de prédiction

La phase de prédiction utilise le vecteur d'état et le modèle dynamique du système. Ce processus se déroule avant la connaissance des observations. Cette étape prédit les états à l'instant t_k en se basant sur l'instant précédent, et est décrite par les équations suivantes :

$$\hat{x}_k^- = A_{k-1} \times \hat{x}_{k-1}^+ \qquad (3)$$

$$P_k^- = A_{k-1} \times P_k^+ \times A^T_{k-1} + Q_k \qquad (4)$$

Le symbole « ^ » correspond à une valeur estimée. La valeur prédite est notée par l'indice « - », et une valeur mise à jour est représentée par « + ». P_k est la matrice de covariance du vecteur d'état mise à jour par propagation de variance et par l'ajout des incertitudes du modèle.

I.5.1.2 Une étape de correction

Dans cette étape, les observations réalisées à l'instant t_k sont comparées à celles prédites afin d'apporter une mise à jour. Cette correction s'applique sur le vecteur d'état, et sur la matrice de covariance comme exposés ci-après :

$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k \times (Z_k - H_k \times x_k^-) \qquad (5)$$

$$P_k^+ = (I - K_k \times H_k) \times P_k^- \qquad (6)$$

où K_k est le gain de Kalman qui pondère la différence entre les observations et l'estimation. Il est défini de façon à minimiser la variance de l'erreur d'estimation et déterminer de manière suivante :

$$K_k = P_k^- \times H_k^- \times (H_k \times P_k^- \times H_k^T + R_k)^{-1} \qquad (7)$$

où R_k est la matrice de covariance du bruit de mesure.

Les mises à jour se font dès que les mesures le permettent, mais une mauvaise modélisation du phénomène entraîne une mauvaise convergence du filtre. Une bonne connaissance des bruits et leurs modélisations est indispensable.

I.5.2 Le bruit blanc gaussien

Cette condition nécessaire dans le filtre de Kalman correspond à une famille discrète des variables aléatoires centrées non corrélées deux à deux, ce qui se traduit par une espérance égale à 0 à tout instant, et une variance finie notée σ^2.
Un processus aléatoire est un bruit blanc gaussien si :

-l'espérance est nulle,
-la variable aléatoire suit une loi normale centrée et de variance σ^2,
-est indépendant.

I.5.3 La variance d'Allan

La qualité des composants étant faible, il est important de quantifier les différents bruits de mesures. Pour ce, nous utilisons au cours de ce projet la variance d'Allan. Nous expliquons ici le principe et la mise en œuvre de cet outil mathématique.
La variance d'Allan est très répandue dans la caractérisation des signaux. Celle-ci s'est développée, car il permet de modéliser les bruits des signaux et d'estimer leurs valeurs. Or, les capteurs sont souvent affectés par plusieurs bruits qui se superposent, donc difficiles à étudier. La méthode de la variance d'Allan permet de les identifier plus aisément.
Dans la pratique, cette technique requiert un temps d'échantillonnage très long. Ensuite, il y a un regroupement en fenêtres temporelles de même taille modulo un nombre entier de l'échantillon. Les valeurs des moyennes par intervalle sont mises en entrée dans l'équation :

$$\sigma^2_{\text{Allan}} = \frac{1}{2n} \times \sum_i^{n-1} (x_{i+1} - x_i)^2 \qquad (8)$$

où x_{i+1}, x_i représentent les échantillons adjacents d'écart de fréquence et n correspond au nombre d'échantillons.

Les résultats présentés sous la forme de courbes représentant l'écart type σ_{Allan} normalisé par la moyenne du signal suivant les intervalles de temps. Le graphique est le plus souvent un graphique log/log. Un exemple représentant la plupart des bruits est illustré sur la **Figure 2**.

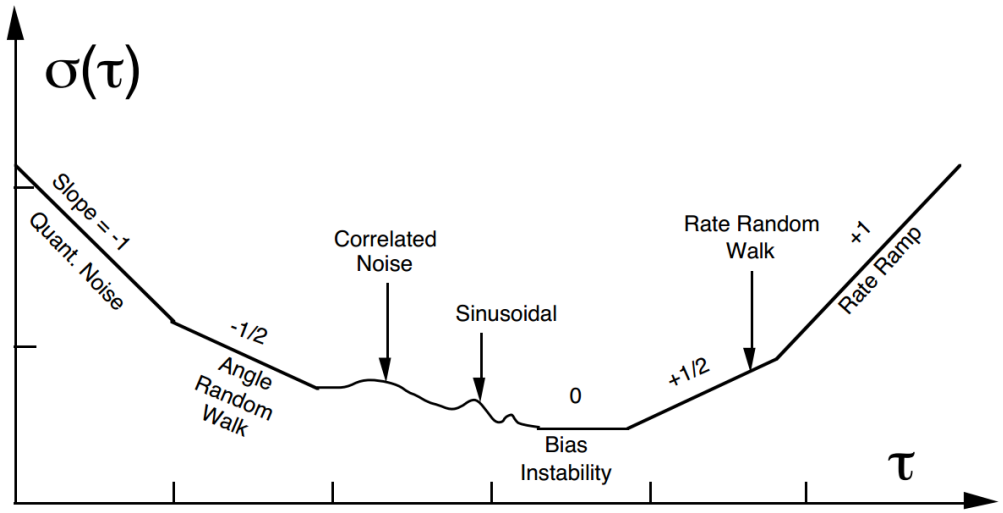


Figure 2 : Graphique type de la variance d'Allan en fonction du temps pour différents bruits (source : [10])

La variance d'Allan représentée sous cette forme permet d'identifier les différents types de bruit, et leur niveau. Si par exemple, le graphique comporte une droite de la pente 0.5 alors nous sommes en présence d'un bruit de type marche aléatoire (Random Walk), dont le niveau se détermine sur le graphique. Pour plus de détail sur l'explication technique de ce graphique et son utilisation, se reporter aux travaux de Haiying Hou chapitre 4 [10] et [2].
L'application de cette technique aux capteurs de la centrale inertielle intégrée sur le smartphone permet de définir les bruits de nos mesures et le modèle suivi.
Un dernier point jugé essentiel par plusieurs travaux dans le domaine est l'utilisation d'un repère unique pour les calculs, impliquant l'utilisation de formule de passage entre les repères.

I.5.4 Changement de repère : géographique WGS84 en projection Lambert 93 avec l'altitude NGF/IGN69

Tout d'abord, rappelons les trois repères utilisés dans notre projet avec celui lié au positionnement GNSS, le repère de calculs et le repère des données INS qui est le repère « body ». Or, pour effectuer les calculs, il est indispensable de travailler dans le même repère, dans notre étude celui de même nom. De plus, l'objectif de l'étude est de géoréférencer les réseaux dans le système légal, le RGF93 en France. Les données GNSS sont dans le référentiel WGS84. Un changement de repère doit être effectué afin de se situer dans le système légal. Ensuite, une projection en Lambert 93 est réalisée pour obtenir des coordonnées planes avec l'altitude NGF/IGN69. Afin de réaliser cette projection, nous avons suivi les prescriptions de l'IGN. Le travail implique de prendre en compte un module d'altération linéaire et une convergence des méridiens.
Les formules de base permettant la réalisation du changement de repère se trouvent en *ANNEXE 1*.

Après avoir mis en exergue ces quelques notions et principes afin de faciliter la compréhension de l'ensemble de l'étude, la partie suivante se focalisera sur les composants utilisés pour réaliser les mesures. Concernant la composante verticale, une transformation est nécessaire entre la hauteur ellipsoïdale et l'altitude NGF/IGN69. La grille de l'IGN, la RAF09[4], permet cette transition.

[4] *RAF09 : Le passage de la hauteur ellipsoïdale à l'altitude se fait à l'aide d'une grille de conversion à l'échelle de la France métropolitaine. Cette grille réalisée par l'IGN est nommé RAF09.*

II Analyse des composants pour le positionnement

Afin de comprendre les différentes étapes d'étude et le schéma général pour le lever des réseaux avec smartphone, une analyse des capteurs utilisés est faite.
Contraint par la DT-Dict, il faut géoréférencer les réseaux avec une précision de 40 cm. Aujourd'hui, le smartphone s'est démocratisé ; il est aussi devenu un produit très performant et polyvalent. Cependant, la qualité des composants est très variable. Les parties ci-après ont pour objet de caractériser les précisions des composants pouvant servir au positionnement.

II.1 La puce GNSS

II.1.1 Rappel sur le positionnement

Depuis quelques années, le GPS s'est développé pour devenir un produit commun à tout le monde. Cependant, peu de personnes connaissent réellement son fonctionnement et encore moins les précisions de son positionnement. Le mot GPS est aussi un terme employé pour désigner plusieurs produits. En effet, le plus souvent les utilisateurs désignent par cet acronyme l'appareil permettant de positionner et de faire un itinéraire. Du point de vue technique, GPS est le terme désignant un positionnement utilisant les satellites américains. Toutefois, il existe d'autres satellites comme par exemple les Glonass, une constellation russe, ou encore les quelques satellites européens Galiléo. La plupart des récepteurs de positionnement utilisent ces trois constellations, et dans ce cas, nous parlons de localisation GNSS.

Aujourd'hui, la capacité d'un appareil à nous localiser semble facile et sans grande contrainte. Il est important de rappeler quelques notions à ce sujet afin de comprendre l'enjeu de géoréférencer un objet à 40 cm. Le positionnement par satellite peut être réalisé avec deux techniques différentes. Tout d'abord, le positionnement absolu avec un seul récepteur utilisant la mesure de pseudo-distance. Cette technique utilise des composants peu couteux avec comme résultat une localisation précise entre 3 et 20 m suivant leur mise en place et les conditions d'utilisation. D'autre part, il existe un autre procédé utilisant la forme du signal et mesurant le déphase de ce dernier avec une réplique produite par le récepteur. La technologie utilisée ici a un coût 100 fois plus élevé que la précédente. Cependant, le résultat est nettement amélioré avec une précision oscillant entre 1 cm et 10 cm suivant les méthodes de mises en œuvre.

Les technologies se développent beaucoup avec comme pivot la communication qui entre naturellement dans le positionnement. Il y a donc des possibilités de compléter ces techniques de localisation avec des services tiers pour améliorer la rapidité ou encore les précisions. Le smartphone est un produit qui s'inscrit directement dans cette ligne de conduite avec une communication de plus en plus développée et simplifiée.

II.1.2 La solution de positionnement des smartphones

Ces appareils embarquent de plus en plus de capteurs dans un espace assez réduit et surtout, avec des prix très abordables. Ce constat laisse penser que la qualité des composants n'est pas la plus performante du marché. Concernant les smartphones de

milieu et haut de gamme, les puces de positionnement utilisent les pseudo-distances avec la constellation GNSS. Des constructeurs de mobiles et de composants emploient le qualificatif A-GPS pour désigner les puces utilisées. Derrière ce terme se trouve une technologie très intéressante qui consiste à assister le positionnement par satellite. Le principe est d'utiliser la connexion internet du mobile pour télécharger les éphémérides et l'heure sur un serveur. Des corrections sont générées à partir d'une position approximative issue des cellules téléphoniques utilisées. Ce procédé a pour résultat une rapidité de positionnement même en zone peu dégagée. À la vue de fonctionnement de cette puce A-GPS, le terme exact qui la qualifierait le mieux serait A-GNSS. De plus, la précision annoncée par les constructeurs pour cette méthode est de 5 m. Si l'on prend un peu de recul, ce mode de positionnement requiert plus que du simple positionnement par satellite. Toutes ces techniques sont utilisées par les constructeurs, mais avec plus ou moins de précision et avec des implémentations différentes.

II.1.3 Tests et analyses sur le smartphone Sony Xpéria Z1 compact

Dans cette partie, il est question d'obtenir à partir d'un mobile récent (2014) et haut de gamme des données issues de la puce GNSS. Le but est de pouvoir caractériser les données en conditions réelles, et de voir s'il est possible d'apporter des améliorations aux résultats. Avant de commencer, nous avons étudié les capacités du matériel. Comme vu précédemment, nous n'avons accès qu'à des coordonnées calculées avec ou sans assistant. La fréquence de mesure ne peut excéder de 1Hz soit 1 mesure par seconde. Tous nos tests effectués supposeront la prise en compte des données issues du réseau internet.

II.1.3.1 Première acquisition de données

Tout d'abord, il faut trouver une application capable de créer un fichier avec les données brutes issues du capteur GNSS. Les constructeurs de ce dernier verrouillent l'exploitation des signaux reçus en donnant seulement l'accès à des coordonnées géographiques. L'utilisation de l'application GPSLogger permet l'export des données en fichier NMEA, Kml, et txt sans aucun traitement supplémentaire. Afin de se rendre compte de la qualité des coordonnées sans parasite due au mouvement et sur un échantillon représentatif, le mobile a été placé sur un support pour permettre une meilleure réception du signal. L'instrument est orienté vers le haut, car le capteur se situe dans la partie supérieure du mobile. La mesure est réalisée sur un point connu pendant une heure. Les paramètres utilisés permettent d'obtenir une position 3D avec un fix actualisé toutes les 60 secondes et une mesure par seconde. Derrière le terme fix utilisé par les constructeurs et programmateurs de puce A-GPS se cache les paramètres utilisés dans les algorithmes de calculs de position. Il intervient dans ces derniers, les satellites choisis dans le traitement ainsi que leurs rôles joués (référence, contrôle), mais aussi, les éphémérides, la synchronisation de l'heure. Des paramètres de correction peuvent aussi intervenir si la position est en DGPS fix. Le graphique de la **Figure 3** représente les variations de la composante Nord en WGS84 au cours du temps.

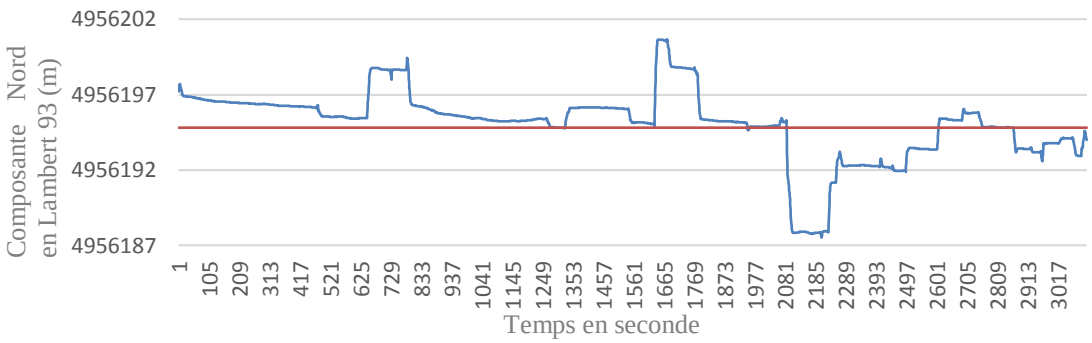


Figure 3 : Graphique illustrant la variation de la composante Nord en fonction du temps en seconde. La courbe rouge est la moyenne (source : données issues du smartphone Sony Z1 compact).

Cette illustration nous montre déjà visuellement le caractère aléatoire du positionnement obtenu, ainsi que la forte amplitude des variations, saut de 3 à 7 m, au cours du temps. En analysant les coordonnées, nous pouvons voir des sauts rapides de position. Ce phénomène peut s'expliquer par un changement de satellite pour se fixer. En effet, le changement des paramètres décrits précédemment au sein des algorithmes peut produire des changements brutaux. Ensuite, sur l'acquisition d'une heure nous ne voyons pas de convergence vers une valeur. Certes, nous pourrions faire le test sur une plus long durée afin d'avoir un échantillon plus représentatif, mais cela n'a pas d'intérêt par rapport à l'utilisation sur le terrain. De plus, les constellations de satellites changeant au cours du temps la stabilité ne serait pas garantie. Maintenant concernant l'amplitude des valeurs, nous arrivons à une amplitude de 13 m en projection plane sur l'une des composantes. Par rapport à la moyenne sur l'heure cela représente un écart type d'environ 6 m. Cette précision peut être qualifiée de précision interne de la puce GNSS, car elle représente les écarts en position entre les points mesurés. Cependant, il est aussi important de connaître la précision en absolu, c'est-à-dire par rapport à une valeur de référence. Sur ce point, le résultat est plus convaincant, car la valeur moyenne se trouve à moins de 1 m sur les deux composantes.

En résumé, le positionnement à un écart type d'environ 6 m qui est centré sur la valeur vraie. Avec un temps d'acquisition très long, le point moyen serait très proche de la vraie valeur comme le laisse penser la **Figure 4** qui illustre les écarts en position planimétrique sur les points au cours d'heure d'acquisition.

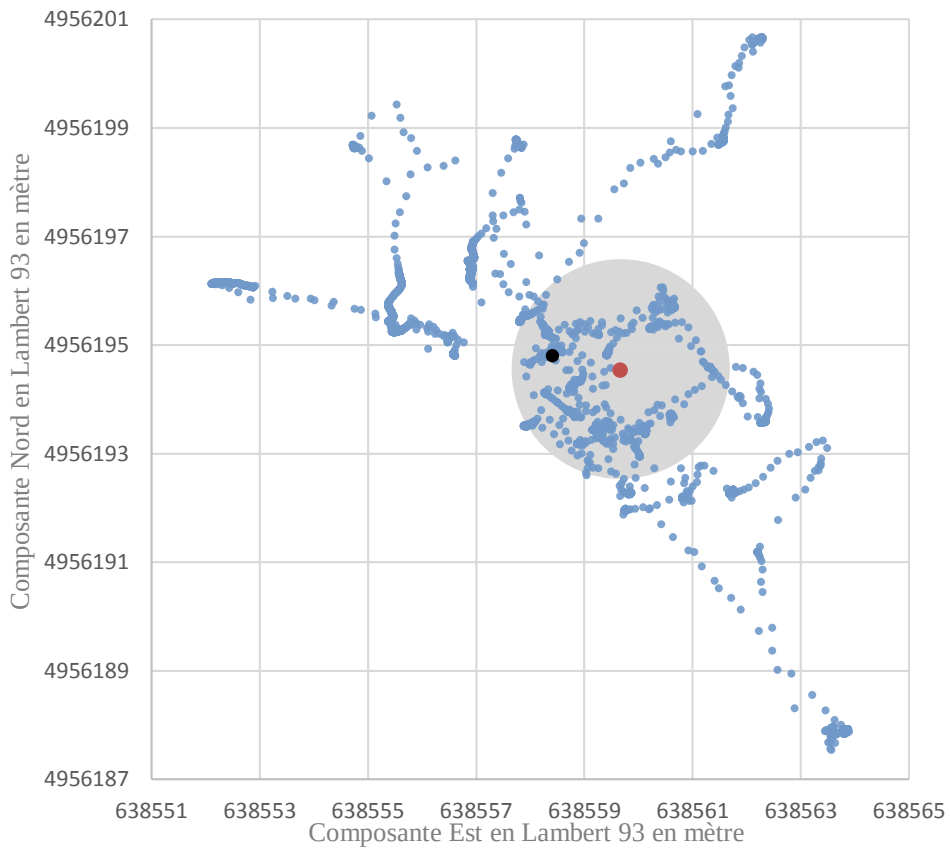


Figure 4 : Graphique des écarts en position planimétrique pour des points issus de la puce A-GPS en une heure avec un fix unique. Le point rouge est la référence et le point noir la moyenne des points. Le cercle gris représente un écart type de deux mètres sur la position.

Cependant dans notre cas, la précision relative est plus importante, car il serait possible d'avoir une référence directement sur le terrain.
Les orbites des différents satellites permettent leurs utilisations pendant environ une heure, sans que la géométrie ait un impact trop grand sur les résultats. Afin de limiter des changements brusques de position dus à un changement de fix comme vu ci-dessus, les résultats de la **Figure 5** montre dans les mêmes conditions que précédemment la variation de la composante Nord sans changement de fix.

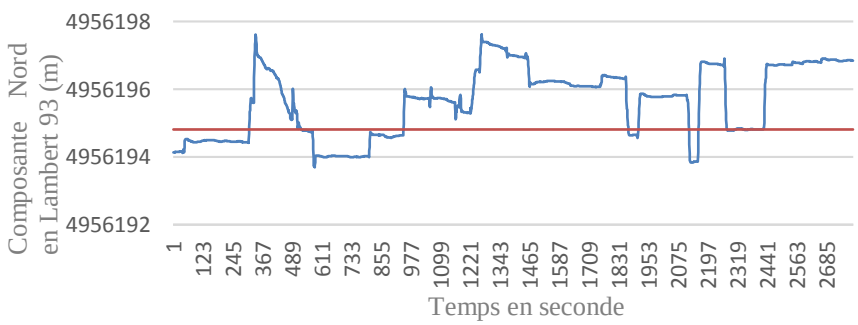


Figure 5 : Graphique illustrant la variation de la composante Nord en fonction du temps en seconde. La courbe rouge est la moyenne (source : données issues du smartphone Sony Z1 compact).

Les courbes sont plus lisses avec des amplitudes moindres avec moins de 4 m sur la courbe représentant la composante Nord sur la **Figure 5**. La superposition des courbes sur la **Figure 6** avec un fix automatique et un fix unique confirme ce phénomène.

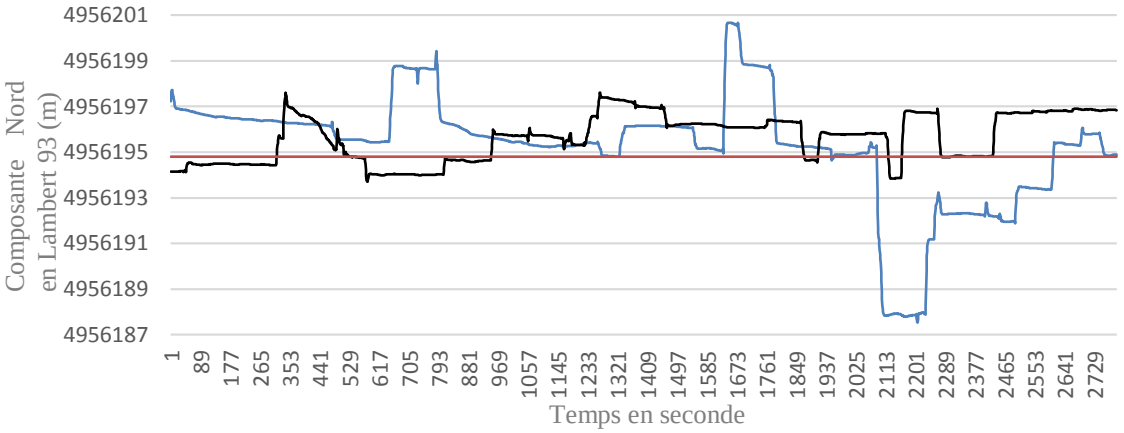


Figure 6 : Graphique superposant les composantes Nord précédentes, avec en bleue le fix automatique, en noir un fix unique et en rouge la valeur de référence.

Ce paramétrage apporte un meilleur résultat visible sur le graphique de comparaison de la **Figure 6**, mais il y a toujours des valeurs très importantes par rapport à la tolérance pour géoréférencer les réseaux. Ces résultats confirment aussi les valeurs données par les constructeurs avec un écart type de 5 m.

II.1.3.2 Tests sur des temps plus courts et en mouvement

Le système de lever devant être rapide et en mouvement pour mesurer les réseaux, des tests dans des conditions similaires sont effectués pour déterminer des écarts types sur les mesures avec ces contraintes. Sur les précédentes acquisitions, il semble que les premières mesures soient très instables. De ce fait, le protocole mis en place est de stationner un point connu quelques minutes, puis de se déplacer vers un autre point connu. Plusieurs expériences ont été réalisées en modifiant le temps de stationnement au début et à la fin, mais aussi la vitesse de déplacement du smartphone. Tout d'abord, un phénomène récurrent se révèle : il faut maximum 30 secondes au système pour se stabiliser une position au démarrage. Ensuite, le déplacement du mobile doit être au maximum d'un pas par seconde afin de conserver une précision optimale sur le trajet. Enfin, nous remarquons que le stationnement d'un point durant 30 secondes permet de stabiliser le signal après un mouvement permettant d'obtenir une valeur moyenne avec un écart type de 4 m correspondant à celui obtenu sur 1h avec un fix constant.

II.1.3.3 Comparaison avec un GPS utilisant le réseau TERIA

Une simulation de réseaux est mise en place en utilisant le marquage du parking. Des points de repère sont mis en place et relevés avec un GNSS utilisant le réseau Teria. Ensuite, une trace est faite du marquage en utilisant le mode de prise de mesure en continu cadencée à une par seconde. Ces points de référence sont ainsi déterminés à moins de 10 cm et visualisable sur la **Figure 7** avec la trace en rouge. Après avoir réalisé plusieurs tests et expérimenté différentes méthodes de correction, une méthode s'est détachée avec des constats. Tout d'abord, à cause du caractère aléatoire des mesures, aucune correction ne peut s'appliquer sur l'ensemble des données. Cependant, les courbes des composantes des coordonnées géographiques sont très intéressantes. La forme permet de déterminer facilement le mouvement, mais aussi de voir les zones d'arrêt comme le montre la trace bleue de la **Figure 7**.

Afin de contrôler au mieux le travail, mais aussi de pouvoir obtenir des résultats plus précis et fiables, la méthode retenue de lever et de calcul se base sur des phases statiques et de mouvement avec redondance.

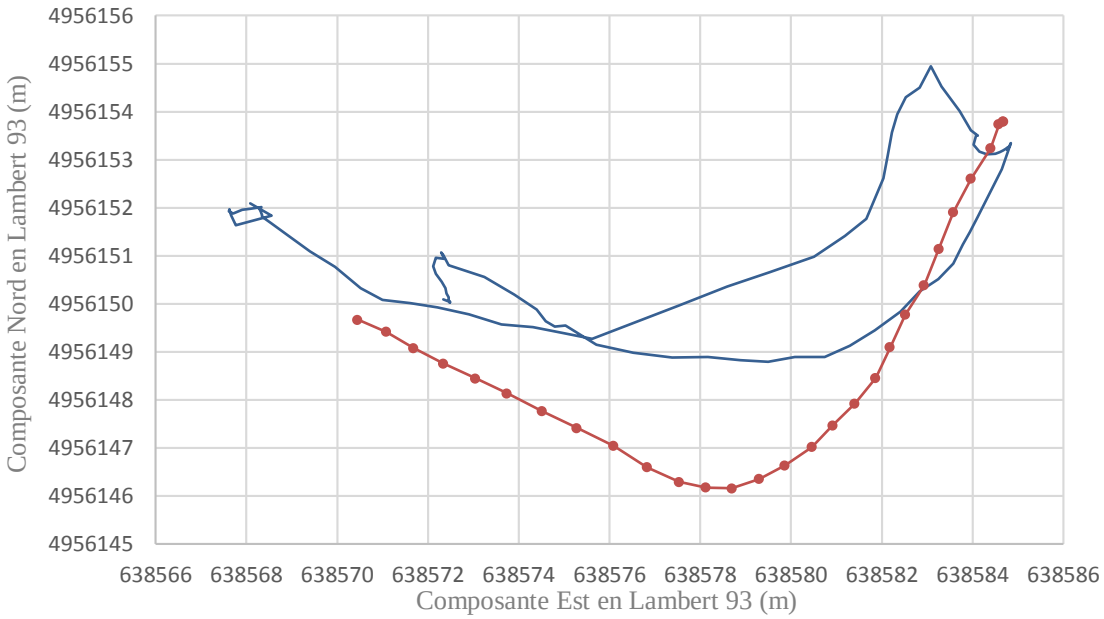


Figure 7 : Graphique de la trace des points mesurés avec le smartphone en bleue et de la référence en rouge en coordonnées Lambert 93.

Concrètement, le lever à la cadence de 1 pas seconde et le travail en cheminement aller-retour permettant la moyenne des valeurs est la méthode qui apporte les meilleurs résultats. Le résultat obtenu est une position connue avec un écart type de moins de 4 m. Toutefois, certains points mesurés en dynamique pendant les différents tests réalisés montrent des écarts variant jusqu'à 12 m.

II.1.4 Bilan du positionnement par la puce GNSS

La puce GNSS fait partie des composants utilisés dans les smartphones mais qui ne sont pas de très grande précision. Avec ce type de capteur, le constructeur annonce un écart type de 5 m dans de bonnes conditions. Le plus gros problème est lié aux données fournies. En effet, il n'est disponible que des coordonnées issues de calculs mélangeant le plus souvent plusieurs techniques non explicitées. De plus, l'utilisation en mouvement du smartphone pendant le lever et le masque généré par l'utilisateur ne représente pas des conditions optimales. De ce fait, nous pouvons nous attendre à un positionnement oscillant entre 2 et 15 m.

II.2 Le système inertiel

Ce terme désigne en réalité deux composants bas coût MEMS : l'accéléromètre et le gyromètre avec en option l'ajout du magnétomètre. Le rôle de ces capteurs est multiple : ils permettent entre autres la rotation automatique de l'écran et le contrôle des jeux par mouvement du téléphone. Cependant, les informations issues de ces derniers peuvent être utilisées pour déterminer un positionnement du smartphone en relatif. Chaque capteur va être détaillé dans ce sens, mais leur utilisation mélange souvent les trois techniques. De ce fait, il est important de voir ensuite les différentes façons de combiner leurs données respectives.

II.2.1 La puce de l'accéléromètre

L'accéléromètre mesure l'accélération suivant trois axes. Dans les smartphones haut de gamme, les constructeurs utilisent des composants de précision assez similaires. Le smartphone Sony Xpéria Z1 compact est équipé d'une puce *Bosch*. Le **Tableau 1** regroupe les principales caractéristiques issues de la fiche technique.

Paramètre	Valeur	Unité
Plage de fonctionnement sur la valeur d'accélération	-4 à +4	g
Plage de fonctionnement sur la température	-40 à +85	°C
Bruit	0.8	mg/√Hz
Non linéarité	±0.5	%FS
Résolution	3.91	mg
Sensibilité	128	LSB/g
Sensibilité de deux axes sur le troisième	1	%
Défaut d'alignement	±0.5	°

Tableau 1 : Tableau des caractéristiques de l'accéléromètre du smartphone (source [17]). La sensibilité est exprimé en bit de poids le plus faible et la non-linéarité en pourcentage de la valeur maximale, ici 4g.

Les premières mesures ont confirmé les faiblesses du capteur reflétées par ce tableau. À titre de comparaison, une centrale inertielle MEMS d'entrée de gamme présente un bruit cinq fois moindre et un défaut d'alignement 10 fois plus précis. Les meilleurs dans le domaine atteignent des incertitudes 125 fois inférieures à ce capteur.

II.2.2 La puce du gyromètre

Le gyromètre mesure également la vitesse angulaire suivant trois axes. Le même constat que pour l'accéléromètre peut être dressé concernant la précision. La puce provient également du constructeur *Bosch*. Le **Tableau 2** montre l'essentiel sur ses caractéristiques.

Paramètre	Valeur	Unité
Plage de mesure	±250	°/s
Plage de fonctionnement sur la température	-40 à +85	°C
Bruit	0.014	°/s/√Hz

Tableau 2 : Tableau résumant les caractéristiques du gyromètre du smartphone (source [16]).

La précision d'un gyromètre MEMS est seulement deux fois moindre de ceux implantés dans une centrale inertielle dédiée d'entrée de gamme. Les capteurs haut de gamme ne sont pas tellement plus précis.

II.2.3 La puce du magnétomètre

Le magnétomètre mesure le champ magnétique suivant trois axes. La qualité d'un magnétomètre MEMS est largement inférieure à celle de ses homologues cinématiques. Ce constat peut s'expliquer par le changement de fournisseur devenu *Asahikasei*. Les données du constructeur sont résumées dans le **Tableau 3**.

Paramètre	Valeur	Unité
Plage de mesure	±4900	µT
Plage de fonctionnement sur la température	-30 à +85	°C
Sensibilité	0.6	µT/LSB

Tableau 3 : Tableau résumant les caractéristiques du magnétomètre du smartphone (source [18]).

La même centrale inertielle utilisée dans les comparaisons précédentes comporte un magnétomètre 300 fois plus sensible, mais doté d'une plage de mesure deux fois plus petite que celle du magnétomètre MEMS. Une combinaison de ces capteurs permettrait certainement une amélioration substantielle du positionnement.

II.2.4 Les valeurs calculées par le système

La surcouche système qui contrôle tous les composants propose l'accès à d'autres grandeurs physiques. Il semblerait à première vue qu'il existe d'autres capteurs ; or, ce n'est en réalité que le résultat de la fusion des capteurs mentionnés précédemment. La détermination de l'accélération propre du mobile, de la force de gravité et de l'orientation sont très intéressantes pour notre cas. Cependant, aucun accès ni aux calculs, ni à la précision de ces résultats n'est disponible.
Toutefois, nous avons estimé la qualité de ces grandeurs. Les variations relatives sont très bonnes, mais il subsiste des erreurs dans le comportement dues à la non-correction des biais. Il en résulte des valeurs incorrectes dues aux décalages avec le zéro et aux facteurs d'échelle. L'opacité de ces fusions est un réel problème pour appliquer des corrections concernant les accélérations. Les valeurs de l'orientation souffrent aussi de ces absences de calibration, mais peuvent faire l'objet d'une correction globale.
L'utilisation de ces capteurs est donc à prendre avec précaution.
Devant le peu d'informations disponibles sur les capteurs et les algorithmes de calculs, il est donc obligatoire de passer par une phase de calibration.

II.2.5 La navigation par système inertiel

Cette technique de positionnement aussi nommée INS utilise un calculateur pour déterminer la position avec l'accéléromètre et le gyromètre. Le principe illustré par la **Figure 8** montre les différentes étapes de calculs pour obtenir la position.

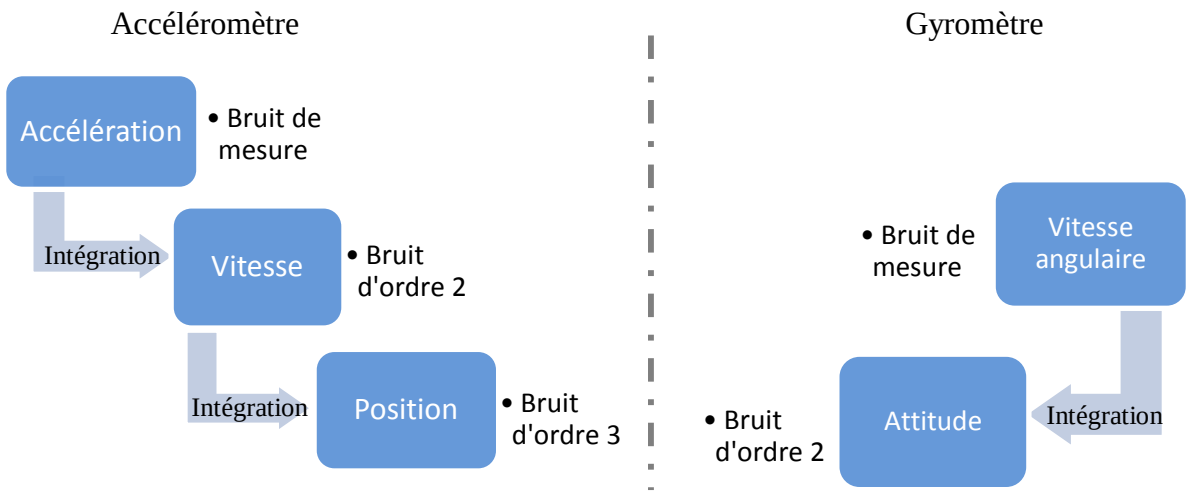


Figure 8 : Schéma de principe des étapes de calculs pour la navigation inertielle avec les deux capteurs, l'accéléromètre et le gyromètre.

Le processus d'intégration utilisé implique l'amplification au degré supérieur des bruits de mesure liés aux capteurs. Les valeurs de l'attitude sont déterminées non pas avec le bruit du gyromètre, mais avec un bruit de degré supérieur, donc qui croît plus vite en fonction du temps. Ce constat est encore plus important avec la position issue de l'accéléromètre. La **Figure 8** montre le passage par intégration à la vitesse et l'intégration de la vitesse à la position. Le bruit est ici deux fois amplifié et se traduit par une dérive très rapide au cours du temps. Il est donc important de connaître la nature du bruit pour en comprendre les conséquences sur la position.

II.2.6 La calibration et détermination du bruit de mesure

La correction des erreurs déterministes est une phase cruciale pour l'utilisation des données issues des capteurs inertiels et du magnétomètre. Les calibrations sont plus importantes suivant les applications envisagées. En effet, les processus mis en œuvre pour déterminer les positions amplifient les erreurs. Ainsi la connaissance du comportement des erreurs dites stochastiques est incontournable pour une optimisation du résultat par filtrage de Kalman. Afin de répondre à ces obligations, des opérations de calibration sont mises en place dans la suite de l'étude. La détermination des bruits de mesure est quant à elle présentée ci-après.

II.2.6.1 Bruit de mesure : Variance d'Allan

Cette sous-partie est consacrée à la qualification des erreurs aléatoires non négligeables sur des capteurs bas coût. C'est généralement sur ce point que la différence de qualité entre les composants apparaît. Dans la communauté scientifique, une méthode très largement utilisée pour étudier les signaux aléatoires est la variance d'Allan. L'application de celle-ci pour les composants MEMS suscite cependant des désaccords. Nous ne recherchons pas là une précision aéronautique, mais des valeurs de même ordre que celle fournie par les capteurs.
Les graphiques sur la **Figure** 9 et la **Figure** 10 sont directement issus des calculs de la variance d'Allan, d'où les valeurs des écarts types sont extraites.

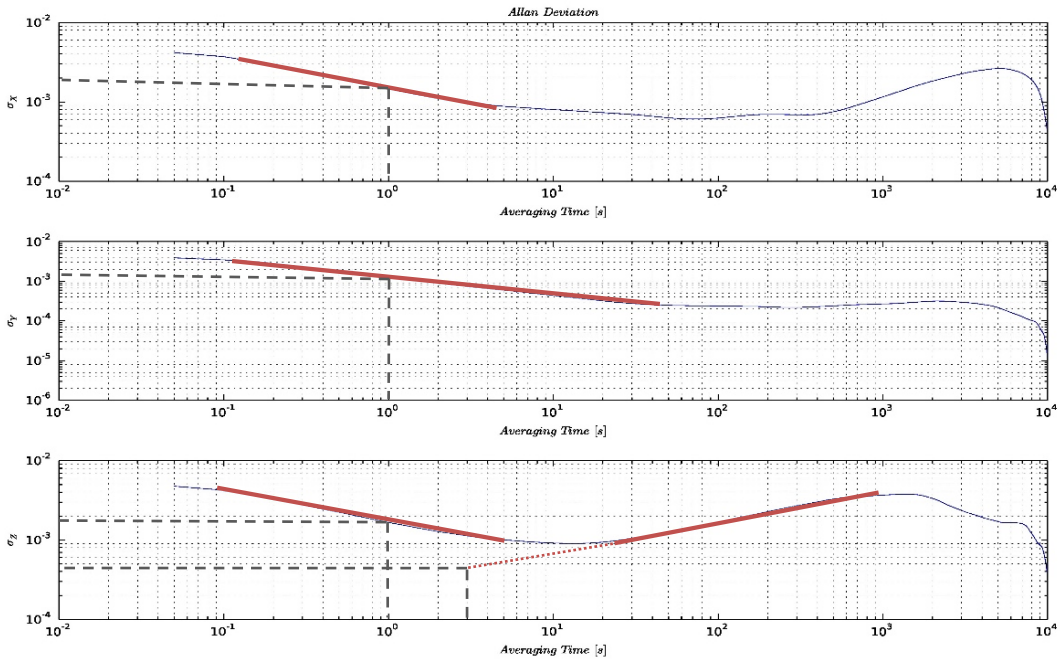


Figure 9 : Graphiques de la variance d'Allan pour les trois axes de l'accéléromètre (source : à partir du travail de Clément ROUSSEL et de la librairie Python « Allantools » d'Anders Wallin). Les traits rouges sont la détection de bruit en lien avec la **Figure 2**. Les traits discontinus sont les amorces de détermination des valeurs associées aux bruits.

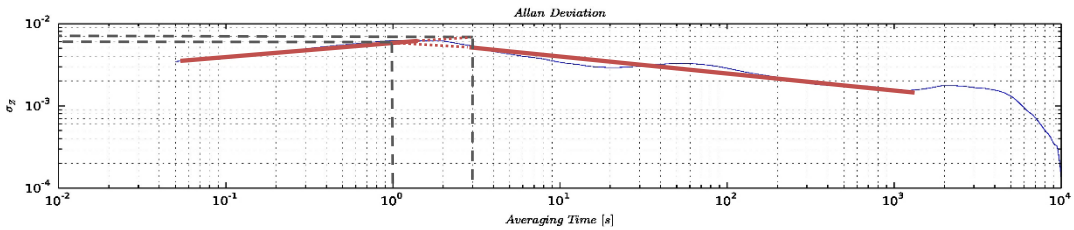


Figure 10 : Graphiques de la variance d'Allan pour l'axe du cap de l'orientation (source : à partir du travail de Clément ROUSSEL et de la librairie Python « Allantools » d'Anders Wallin). Les traits rouges sont la détection de bruit en lien avec la **Figure 2**. Les traits discontinus sont les amorces de détermination des valeurs associées aux bruits.

Le premier constat issu de la Figure 9 est la non-homogénéité des axes au sein de même capteur. Toutefois, l'ordre de grandeur des valeurs est assez proche, mais cela révèle ici la faible qualité des composants. Celle-ci était déjà manifestée sur la courbe de l'enregistrement des données en fonction du temps qui présentait des sauts de valeurs.

Le deuxième graphique est très intéressant, car il est le résultat du capteur orientation, correspondant à la fusion des trois autres. Dans la théorie, le cap est censé être le seul à utiliser le magnétomètre.

Maintenant, en comparant les résultats à la courbe type vue dans la première partie, des formes de bruits peuvent être conjecturées avec des valeurs d'écart type. Pour l'accélération, les deux premiers axes seraient le reflet d'un bruit blanc d'écart type 0.002m/s². Concernant la troisième composante, la courbe est différente et correspond à celle d'un bruit blanc de 0.0015m/s² d'écart type et d'une marche aléatoire de 0.0005 m/s²/√s.

Concernant l'orientation, ce capteur étant un résultat de calculs, nous pouvons nous attendre à un mélange de plusieurs bruits. La variance d'Allan nous montre une marche aléatoire de 0.007 °/√s et un bruit blanc 0.006 degré d'écart type.
En analysant ces résultats, les données d'enregistrement ne sont globalement pas très bonnes, mais exploitables. Ce phénomène peut s'expliquer par une qualité faible des capteurs, mais aussi par un manque de stabilité du support du smartphone pendant la période d'enregistrement des données. Les écarts types avec la nature du bruit sont des indications sur les incertitudes des capteurs. Ces biais entraînent des dérives considérables au cours du temps. Le **Tableau 4** illustre un exemple d'imprécision sur la position liée aux bruits de mesure sur l'accéléromètre en fonction du temps. Les valeurs des dérives au cours du temps montrent bien l'importance du problème des capteurs MEMS.

Temps	10 s	120 s	300 s	600 s	1800 s
Imprécision en position pour une fréquence de 20 Hz	0.006 m	0.407 m	2.263 m	8.643 m	75.256 m
Imprécision en position pour un biais	0.025 m	3.600 m	22.500 m	90.000 m	810.000 m

Tableau 4 : Résultat sur la position de deux imprécisions de mesure. La première ligne correspond à l'imprécision en position causée par un bruit blanc d'écart type 0.002 m/s² et d'une marche aléatoire d'écart type 0.0005 m/s² par racine carrée du temps sur l'accélération au cours du temps. Les valeurs montrent l'impact de la double intégration sur un bruit de mesure d'un capteur MEMS sur des durées courtes. La deuxième ligne montre l'impact d'un biais de 0.0005 m/s² sur l'accélération sur la position.

II.2.7 Bilan du système inertiel

L'étude de l'ensemble constituant le système inertiel débouche sur un bilan mitigé. Tout d'abord, rappelons que ces capteurs vendus au sein d'un smartphone, pour moins de 800 €, ne peuvent pas avoir les mêmes résultats en termes de précisions que les systèmes spécialisés coûtant entre 5 et 250 fois plus cher. L'une des conséquences directes est la nécessité de calibrer les capteurs pour être utilisés dans une application topographique. L'autre contrainte qui ressort est la précision intrinsèque qui ne permet pas l'utilisation en autonomie pour répondre aux tolérances imposées dans le cadre de ce travail.
Cependant, les caractéristiques et résultats sont proches des systèmes utilisés dans les travaux de [4], [5], [6] laissant entrevoir une possibilité d'utilisation dans une hybridation combinant les données de plusieurs capteurs.

III Hybridation GNSS/centrale inertielle

La présentation faite jusqu'ici des différents composants équipant les meilleurs téléphones, indique que l'utilisation de MEMS et de puces GNSS ne permet pas de satisfaire les exigences de la DT-Dict. L'étude s'oriente sur un travail vers la réalisation d'une combinaison de mesures issues de ces différents capteurs.

III.1 Pourquoi coupler un système inertiel avec un positionnement GNSS ?

Le principe de base est de rassembler les forces de chacun pour corriger les faiblesses des autres. Le couplage des deux systèmes de positionnement est à l'instar d'une équipe, où chacun jouant le rôle où il excelle, permet de produire un ensemble homogène de très bon niveau. Ici, l'hybridation a la même vocation : garder les meilleures caractéristiques pour produire un résultat de meilleure qualité.
La solution la plus communément adaptée consiste à utiliser la localisation par satellite pour estimer les erreurs du système inertiel. En effet, sur les types de composants à disposition, les erreurs de positions, de vitesse, et d'attitude sont directement liées aux erreurs de capteurs. De par leur conception, l'accéléromètre, le gyromètre et le magnétomètre comportent des erreurs de biais, de dérives, et d'autres bruits. D'autre part, le positionnement par GNSS est influencé par les conditions atmosphériques, des biais et dérives d'horloge.
Le **Tableau 5** suivant résume les caractéristiques les plus importantes concernant la complémentarité des deux systèmes.

Système	Inconvénients	Avantages	Type de donnée en sortie
INS (Inertial Navigation System)	Nombreux bruits de mesure engendrant des dérives importantes de la position, vitesse au cours du temps.	Très bonne précision à court terme, continuité du positionnement, autonome (pas besoin d'autre service), taux d'échantillonnage élevé.	Position en 3D en relatif, vitesse avec des angles d'attitude
GNSS	Ne dispose pas d'information sur la qualité des signaux et éphémérides, discontinuité de la localisation suivant l'environnement, taux d'échantillonnage faible.	Précision absolue constante dans le temps	Position en 3D en absolue, vitesse, temps

Tableau 5 : Tableau récapitulatif des avantages et inconvénients des systèmes INS et GNSS.

Le système de navigation inertielle est un atout de par sa précision mais aussi de par la continuité des informations indépendantes de son environnement qu'il délivre. Cependant, ce système utilisé seul a un résultat inexploitable à cause de l'importante dérive au cours du temps.
Le positionnement GNSS étant à 3 m près, il n'est pas très exploitable tel quel, mais sa stabilité au cours du temps est un point non négligeable.

Le couplage a pour objectif l'obtention d'une précision de positionnement à moins de 40 cm, se traduisant par les améliorations suivantes :

-limiter la dérive de la navigation du système inertiel en utilisant l'erreur bornée au cours du temps de la localisation par GNSS, mais aussi de permettre une calibration des erreurs inertielles;

-le positionnement en continu à l'aide de l'INS même dans des zones où les signaux des satellites seraient interrompus.

III.2 Les méthodes d'hybridation

La fusion des données issues de plusieurs capteurs peut se réaliser de diverses façons suivant les qualités des composants et du résultat voulu. Les systèmes ont des performances individuelles qui ne permettent pas le positionnement conforme aux exigences de la DT-Dict. Pour la navigation, il existe aujourd'hui trois grands types de couplage, lâche, serré ou très serré. Ensuite chaque couplage se décline en plusieurs variantes suivant le besoin.

III.2.1 L'hybridation lâche

Le principe de cette composition est le traitement séparé des données brutes avant de les regrouper. Le positionnement issu du GNSS est utilisé sous la forme de coordonnées. Il en va de même pour la centrale inertielle. Ensuite, le processus de fusion est mis en place par le filtre de Kalman et fournit la solution de positionnement. Les deux variantes possibles sont soit la boucle fermée soit la boucle ouverte.

Dans le premier cas, les corrections sont apportées au niveau des données brutes de l'INS, avant les intégrations de détermination de la vitesse et de la position. Cette méthode est recommandée par la communauté, car elle permet de palier aux défauts des capteurs MEMS bas coût. Ensuite, cela permet d'éviter les problèmes de linéarisation pour les hypothèses du filtre de Kalman étendu. Cependant, les erreurs de l'un ou l'autre système de positionnement seront propagées dans tout le calcul et donc très difficiles à déceler.

Dans le second cas, les estimations des erreurs sont bien déterminées, mais ne sont pas utilisées dans le calcul. Ce modèle ne corrige donc pas les dérives de la centrale inertielle. Cette méthode est à utiliser dans les systèmes composés de capteurs haut de gamme, précis et très fiables.

Nous avons là une solution de navigation déterminée par la centrale inertielle avec des dérives estimées, voire corrigées par le filtre de Kalman à l'aide des points GNSS.

III.2.2 L'hybridation serrée

Dans cette stratégie de fusion, les données utilisées ne sont pas traitées, il faut néanmoins écrire les équations d'observation qui permettent de remonter jusqu'aux coordonnées. Cela se traduit par l'utilisation de pseudo distance ou de la phase pour le GNSS. De ce fait, il n'y a qu'une seule position en sortie : celle hybridée.

Dans la pratique, le résultat est en général meilleur que l'hybridation précédente et permet surtout de continuer l'utilisation des signaux des satellites même en nombre faible.

Dans cette procédure, il est crucial d'avoir un signal GNSS de grande qualité, puisqu'il est le support essentiel de la solution finale. Il est aussi possible de mettre en œuvre cette technique soit en boucle ouverte ou fermée.

III.2.3 L'hybridation très serrée

La présentation de ce couplage reste générale, car plusieurs types d'architectures rentrent dans l'hybridation très serrée. L'angle d'attaque est très différent ici. La centrale inertielle est utilisée pour assister le GNSS dans sa poursuite du signal. Ainsi, les pseudo-distances sont générées localement et directement fusionnées avec les informations inertielles. Cette procédure corrèle les deux systèmes, mais renforce la robustesse du récepteur GNSS face au signal. Toutefois, l'hybridation très serrée reste complexe à mettre en œuvre.

III.2.4 La méthode la plus adaptée aux smartphones

À la vue des propositions de fusion, les techniques les plus complexes semblent apporter des résultats plus précis. Cependant, la qualité des composants et de leurs informations est un paramètre majeur dans le choix de la méthode.
Tout d'abord, rappelons les résultats présentés précédemment. Les composants accéléromètre, gyromètre, et magnétomètre sont avérés non adaptés au but poursuivi. De plus, la partie sur le positionnement GNSS a révélé la possibilité d'avoir accès juste aux coordonnées des points et non au signal. Ces caractéristiques nous contraignent quant aux choix de l'hybridation. Il est aujourd'hui obligatoire de procéder à un schéma de couplage lâche. Par ailleurs, le résultat obtenu sur la position doit être de qualité décimétrique imposant la prise en compte de la correction des erreurs inertielles.
Toute l'étude qui va suivre va se reposer sur une fusion des données suivant la technique de l'hybridation en couplage lâche en boucle fermée ou ouverte, schématisé sur la **Figure 11**.

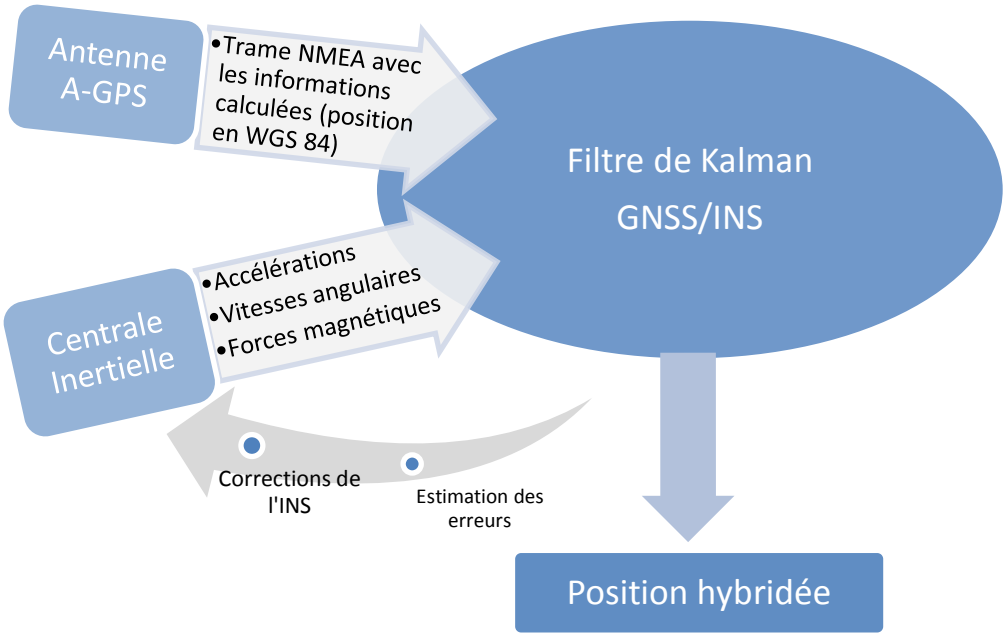


Figure 11 : Schéma synthétisant le principe de la fusion par un filtre de Kalman.

III.3 Les changements de repère

Le travail pour calculer la solution hybridée doit être effectué dans le même repère, celui de calculs. Nous avons deux changements de système distinguant, soit le passage du repère géographique vers le repère de calculs pour les données issues des satellites, soit du repère « body » vers le repère de calculs pour les informations issues des capteurs inertiels.

III.3.1 Repère géographique vers le repère Calculs

Le passage de l'un à l'autre est présenté dans la partie I. Nous allons détailler le changement du repère nécessaire entre WGS84 et RGF93 qui se décompose en plusieurs étapes. Le WGS84 est un système de positionnement global à l'échelle de la planète utilisé par le système GPS. Il en existe d'autres comme le système de référence mondiale « International Terrestrial Reference Frames (I.T.R.F.) » qui tient compte de la vitesse de déplacement des continents. « *Thus, ITRF2008 and WGS84(G1674) are likely to agree at the centimeter level, yielding conventional 0-transformation parameters* », cette récente publication de [20] permet de dire que le WGS84 est égal à ITRF2008. Ensuite depuis 2010, l'IGN a mis en compatibilité le RGF93 avec l'ETRF2000[5]. Le changement de repère revient donc entre ITRF2008 et ETRF2000. Cette transformation permet de tenir compte du déplacement des plaques tectoniques qui représente environ 50 cm.
Les détails de calculs se trouvent en *ANNEXE 2*.
Il faut rappeler que cette transformation ne dégrade pas la précision. La précision de la puce GNSS pourrait nous permettre de ne pas tenir compte de ces 50 cm de décalage.
La projection présentée dans la partie I peut varier suivant les contextes, la transformation s'adapte en fonction du système de projection comme par exemple les coniques conformes. Il est important de rappeler que chaque projection utilisée à des contraintes propres. Dans notre cas, il faut tenir compte de l'angle de convergence des méridiens et de l'altération linéaire qui ne sont pas négligeables suivant les lieux.

III.3.2 Repère « Body » vers le repère Calculs

Suivant les informations utilisées et le traitement associé, le changement de repère s'effectue de façon différente. Dans un premier temps, les informations d'angles définissent l'attitude du mobile. Ces données permettent de déterminer la matrice de rotation transformant un vecteur du repère Body dans le repère navigation. Dans un deuxième temps, nous pouvons utiliser directement l'angle par rapport au nord magnétique en corrigeant la déclinaison magnétique.

III.4 Une multitude de données, quelle solution ?

Dans la littérature sur le domaine [4], [5], [7], [12], le simple couplage des données est insuffisant. La force, mais aussi l'innovation est de combiner les données

---

[5] *ETRF2000 : European Terrestrial Reference Frame 2000 est une réalisation de l'ITRF en fixant les vitesses à zéro pour le continent Européen. Il est le système de coordonnées légal Européen.*

sous des formes différentes et complémentaires pour pallier la faible qualité de ces dernières. En effet, la surabondance des informations par rapport aux problèmes est un moyen d'abaisser la barre d'erreur. Dans cette étude, trois assemblages de données en sont ressortis produisant chacun un positionnement avec des forces et faiblesses différentes.

III.4.1 Le GPS au service du positionnement INS

Le premier rapprochement est la fusion entre les coordonnées issues des satellites et celles obtenues à l'aide de la double intégration de l'accélération du mobile au cours du temps. Cette combinaison est intéressante pour apporter une stabilité à la solution INS. Le principe est de déterminer une position hybride absolue, mais aussi d'estimer les erreurs des capteurs de la centrale inertielle comme repris sur la **Figure 12**.

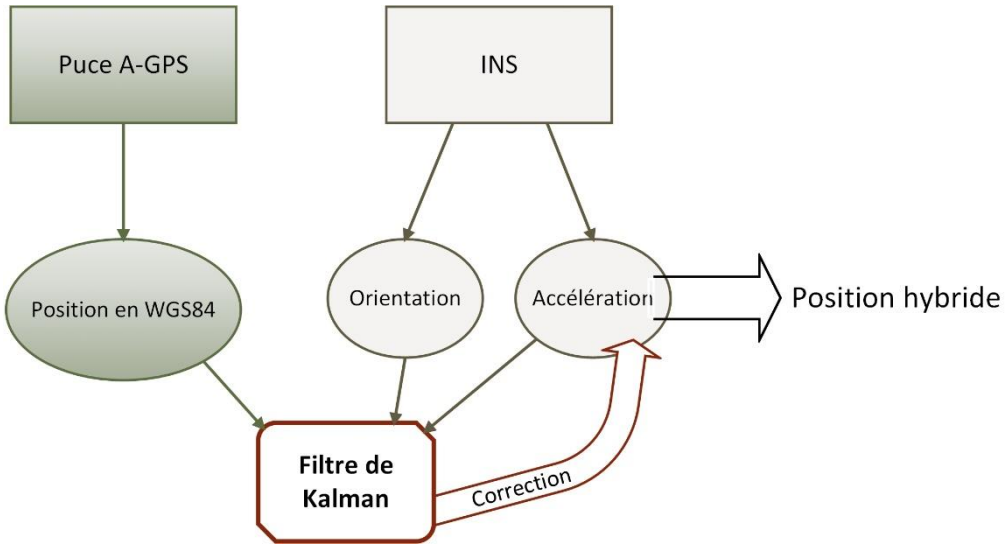


Figure 12 : Graphique mettant en relations les différentes informations issues du smartphone dans une hybridation par filtre de Kalman.

La réalisation de ce couplage nous révèle une solution sans amélioration significative par rapport au GNSS seul. Le problème vient d'un positionnement par satellite trop imprécis pour permettre d'apporter des corrections suffisantes. Le géoréférencement obtenu est supérieur à 2 mètres.

III.4.2 La correction de l'accélération par la distance d'un pas

L'utilisation du GPS pour corriger les données INS n'étant pas assez précise, on compare ici la distance d'un pas avec celle déterminée par l'intégration de l'accéléromètre. Le principe est d'obtenir une correction par intervalle afin de réduire les dérives. La variation de cette distance étant assez faible, une valeur moyenne permet d'avoir un niveau de précision meilleur que par les données GNSS. La valeur de l'accélération sur un temps si faible est inférieure à la valeur du bruit du capteur. La combinaison de ces deux données dans le programme revient juste à la simple utilisation de la distance du pas. Ces deux premières approches sont intéressantes, mais leurs présentations séparées sont insuffisantes.

III.4.3 Le GPS assisté par la biomécanique

Jusqu'à présent, le principe de la navigation inertielle était employé. L'utilisation de l'intégration des valeurs issues de ces capteurs au cours du processus engendre un bruit empêchant une exploitation des informations. De ce fait, une autre méthode pour utiliser les capteurs accéléromètre, gyromètre et magnétomètre doit être mise en place. Il faut dans le cas des capteurs MEMS privilégier le signal sous sa forme brute afin de réduire les dérives importantes au cours du temps. De ce fait, notre étude s'oriente vers la méthode utilisant les principes de la biomécanique qui représente l'étude du mouvement de marche de l'humain. À travers ce processus, il est possible de déterminer des relations entre un individu avec la fréquence de marche et la longueur d'un pas. Les recherches de [4], [5], [14] permettent de faire un lien entre la forme -plus précisément la fréquence de la norme de l'accélération avec la fréquence de marche- et la taille du pas effectué.
Le principe de navigation à l'aide de la biomécanique est l'utilisation d'une distance de pas orienté. Dans notre cas, les capteurs du smartphone détectent les pas, la fréquence de ces derniers et en parallèle un calcul d'orientation s'effectue. La combinaison d'une distance et d'une orientation nous permet d'obtenir une position relative à un point.

Les incertitudes sur la position sont directement liées sur la précision de la longueur du pas et de l'orientation. Les contraintes sur le terrain pour maintenir une cadence de marche exploitable sont aussi des contraintes à la mise en œuvre de cette technique. De ce fait, cette position utilisant la biomécanique est encadrée par l'apport de données GNSS.

L'enjeu est double, avec tout d'abord la réduction de l'utilisation de l'intégration des données et ensuite la réalisation d'une position hybride conforme à la classe de précision de 40 cm. Un schéma de principe mettant en relation cet assemblage est présenté **Figure 13**.

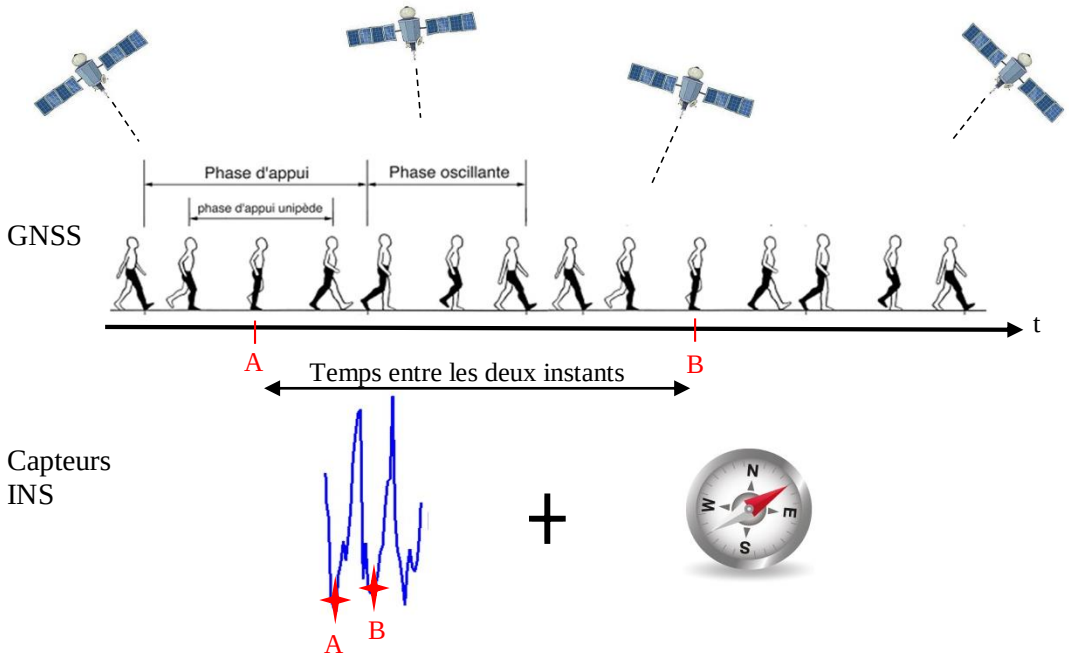


Figure 13 : Schéma illustrant le principe du GNSS assisté par la biomécanique avec les informations disponibles d'un smartphone au cours du temps.

L'étude de la marche humaine révèle la répétition d'un motif élémentaire. La **Figure 13** illustre de façon simplifiée les différentes phases d'un cycle. Les deux points A et B représente les moments statiques du pied en appui sur le sol. La courbe bleue représentant la norme de l'accélération est minimale à ces instants. Par conséquent, cette périodicité de la marche se retrouve sur la courbe de l'accélération. En ajoutant à ces moments caractéristiques la notion de temps, nous pouvons par analyse du signal en déduire une fréquence de marche. Le lien entre la distance et la fréquence de marche présenté dans les recherches de [4], [5], [14] est énoncé dans la partie IV.1.1.2, formule 9. En exploitant les trois composants, nous avons la direction représentée par la boussole sur la **Figure 13**. Les deux informations ainsi disponibles, l'utilisation de la formule 10 de la partie IV.1.1.2 permet de faire le lien avec les coordonnées d'un positionnement relatif.

Ainsi, l'étude de la biomécanique permet à l'aide des capteurs du smartphone de produire une position avec un bruit de mesure non amplifié pour l'accélération. Ce processus parvient à réduire les dérives dues à l'utilisation des capteurs MEMS par rapport au système inertiel.

La réalisation de ce jeu de coordonnées issue de l'accéléromètre, du gyromètre et du magnétomètre et de la récupération de la position GNSS nous permet d'envisager une nouveauté dans le couplage lâche.

IV Innovation apportée

Notre étude a pour but d'obtenir une solution respectant les prescriptions de la DT-Dict. Parmi les assemblages de données présentés dans le chapitre III.4 seule la dernière pourrait arriver à ce but. La mise en place de cette hybridation est basée sur le principe du filtre de Kalman. Cette partie se propose de détailler la solution programmée.

IV.1 Le couplage GPS/biomécanique

La fusion des données intervient à l'issue de deux calculs différents menés en parallèle. D'une part, le calcul du positionnement par satellite avec la transformation dans le repère calculs. D'autre part, la détermination du cap, de la longueur d'un pas et de sa fréquence. Ces éléments sont ensuite combinés pour déterminer un positionnement relatif dans le repère de calculs. Une fois les deux jeux de données synchronisés, le couplage entre eux est réalisé.
Nous allons décrire le fonctionnement avec la détermination des différents modèles mis en place pour la réalisation de ce dernier point par filtre de Kalman. Comme présenté (cf. partie I.4), il faut un vecteur d'état, un modèle d'évolution et un modèle d'observation.

IV.1.1 Préparatif des données

IV.1.1.1 Les informations des trames NMEA

Le positionnement par GNSS est directement donné sous la forme de coordonnées WGS84 géographiques (cf partie II). Ces informations inscrites dans la trame NMEA sont directement transformées dans le repère calculs grâce aux formules vues dans la partie III.3.1.

IV.1.1.2 La détermination des coordonnées issues de la biomécanique

L'une des nouveautés de cette étude réside dans ce calcul de position. Nous allons maintenant expliciter ce procédé qui repose sur la description faite dans le paragraphe III.4.3.
Tout d'abord, il faut déterminer les caractéristiques de marche, c'est-à-dire la fréquence de pas et sa longueur. Pour la première, nous utiliserons la transformée de Fourrier pour traiter le signal afin d'en extraire la fréquence prédominante.
Ensuite, la longueur d'un pas peut être déterminée par la formule [5] ci-après :

$$Dpas = \mathrm{h} \times (\mathrm{a} \times \mathrm{f} + \mathrm{b}) + \mathrm{c} \qquad (9)$$

où h est la taille de l'utilisateur en m,
f est la fréquence de pas,
a, b, c sont des paramètres à étalonner.

Les données concernant la longueur de pas étant déterminées, il faut à présent connaître la direction d'application. Pour ce faire, nous allons utiliser le résultat de la combinaison des valeurs de l'accéléromètre, du gyroscope et du magnétomètre fourni par le smartphone. L'orientation qui en résulte permet d'avoir le cap, c'est-à-

dire l'angle entre le nord magnétique et la direction de nos points. La relation permettant de relier ces données aux coordonnées du point est présentée dans le système ci-dessous :

$$\begin{cases} x = \sin(cap) \times Dpas + x_0 \\ y = \cos(\text{cap}) \times Dpas + y_0 \end{cases} \qquad (10)$$

L'angle « cap » représente l'angle issu du smartphone. Les données x_0 et y_0 dans l'équation 10 sont les coordonnées du point précédent. Notons qu'il est seulement question d'une localisation planimétrique avec cette relation.
À ce stade, la conformité dans le repère de calculs, c'est-à-dire en Lambert 93 dans nos cas, n'est pas totalement réalisée. Tout d'abord, le cap est en fonction du Nord magnétique alors que le système de coordonnées est en Nord Lambert. Il faut donc corriger l'angle de la déclinaison magnétique et de la convergence de méridien. Cette dernière vaut en ce lieu -1.27° tandis qu'en ce début d'année 2015, la première vaut 1.12°avec une variation de près de 0.1° par an. La somme des deux étant proche de zéro, nous négligerons dans les calculs la correction de ces deux angles. Ensuite, il y a le coefficient d'altération linéaire qui s'applique sur les distances. Il dépend du lieu et vaut dans cette zone -476 mm/km. Cette correction représente 1 cm sur 20 m. Nous ne prendrons donc pas en compte cette correction sur de telles distances.
Nous sommes finalement avec deux coordonnées dans le repère calculs pour déterminer un point. Nous allons maintenant détailler la fusion par le filtre de Kalman par l'intermédiaire de ces éléments principaux : un vecteur d'état, un modèle d'évolution et un modèle d'observation.

IV.1.2 Le vecteur d'état associé

Le choix de calculer séparément la position des points nous conduit au vecteur d'état suivant :

$$X_k = \begin{bmatrix} Ex \\ Ey \\ Ez \end{bmatrix}_k \qquad (11)$$

avec Ex, Ey et Ez l'écart entre la position du GPS et celle issue du traitement de la biomécanique.

Au cours du processus, il y a la phase de prédiction de ce vecteur suivant un modèle d'évolution.

IV.1.3 Le modèle d'évolution du système

Le passage de l'état t_k à t_{k+1} se fait à l'aide de la matrice de transition notée A_k et déterminée de la manière suivante :

$$A_k = A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = I_3 \qquad (12)$$

Cette expression traduit une erreur constante au court du temps entre chaque composante de la position. Nous supposons par cette matrice identité une erreur constante au cours du temps à un bruit près.

Dans notre cas, ce phénomène peut être entaché d'un bruit de variance Q et de la forme suivante :

$$Q = \begin{bmatrix} (0.01 \times distX)^2 & 0 & 0 \\ 0 & (0.01 \times distY)^2 & 0 \\ 0 & 0 & (0.01 \times distZ)^2 \end{bmatrix} \qquad (13)$$

avec distX, distY et distZ les distances sur les composantes respectives X, Y et Z.
La variance du bruit tient compte de la distance, car l'incertitude sur l'erreur croit en fonction de cette grandeur. Le coefficient correspond à 1 % de celle-ci et est déterminé en fonction des différentes lectures sur le sujet [4], [5].
Après avoir déterminé les matrices des inconnues, de transition et de variance sur le modèle, nous allons nous intéresser au modèle d'observation permettant l'étape de correction.

IV.1.4 Le modèle d'observation

Au vu du dispositif mis en place pour ce couplage, le modèle d'observation va regrouper les deux jeux de coordonnées. Les positions calculées préalablement par le GPS et le système biomécanique sont au cœur du modèle d'observation. L'erreur de position est obtenue par différence entre la première détermination et la deuxième. La mise en forme pour l'utilisation du filtre de Kalman nous crée les matrices Z, H et la matrice de variance du bruit de mesure RR décrites ci-après :

$$Z_k = \begin{bmatrix} X_{gps} - X_{Biom} \\ Y_{gps} - Y_{Biom} \\ 0 \end{bmatrix}_k \qquad (14)$$

Où X_{gps} est la composante X issue du positionnement par GPS, et X_{Biom} celle issue du système biomécanique avec la longueur de pas. La dernière ligne est égale à zéro, car nous n'avons pas de donnée issue de l'accéléromètre, du gyromètre ou du magnétomètre. Z est le vecteur des observations.

$$H_k = \mathrm{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = I_3 \qquad (15)$$

H est la matrice de passage des observations.

$$RR = \begin{bmatrix} {\sigma_{gps}}^2 & 0 & 0 \\ 0 & {\sigma_{gps}}^2 & 0 \\ 0 & 0 & {\sigma_{gps}}^2 \end{bmatrix} \qquad (16)$$

avec σ_{gps} l'écart type de positionnement du GPS.

La méthode permettant de géolocaliser un réseau étant définie, nous pouvons estimer des résultats avant de mettre en place le protocole de lever ainsi que sa calibration.

IV.2 Les résultats attendus

Par la mise en place de ce protocole de fusion, nous cherchons à combiner différentes données issues de capteurs différents et de techniques différentes. La qualité des composants ne permettant pas d'avoir des précisions de mesures suffisantes, le couplage est le moyen d'exploiter au mieux la force de chacun en diminuant leurs faiblesses. Nous espérons ainsi arriver à un positionnement inférieur à 40 cm pour respecter la classe de précision de la DT-Dict. Les différentes incertitudes évoquées sur les composants, mais aussi dans les études de la biomécanique nous conduisent à encadrer la méthode de lever. Cette équation entre la méthode de couplage et la technique de lever est indispensable pour espérer atteindre l'objectif.
Nous allons maintenant présenter cette procédure d'acquisition de données.

V Expérimentation du protocole

Dans cette partie, nous allons réaliser un lever. La qualité des résultats étant très dépendante non seulement du protocole sur le terrain, mais aussi d'étalonnage, il s'agit là de valider le couplage et la méthodologie.

V.1 Présentation du test

L'expérimentation doit permettre dans ces caractéristiques de reprendre celle des chantiers. Juste un rappel : le dispositif doit être utilisé en tranchée ouverte, donc dans un chantier en cours. L'environnement peut-être très varié avec des contraintes fortes. De plus, la précision de lever doit respecter la classe de précision de 40 cm définis par la DT-Dict. Ensuite, la durée de lever est un paramètre qui est contraint par la longueur de réseau à géolocaliser. Dans les faits, un réseau humide a souvent un regard tous les 20 et 30 m. Le test est aussi le moyen de montrer les précisions espérées pour notre dispositif de lever avec un simple smartphone. Enfin, l'étude des performances et l'analyse du comportement de la dynamique des points sont le moyen d'ajuster le protocole.
Au vu de ces éléments, nous avons mis en place deux segments de 20 m sur une zone légèrement en pente et peu accidentée. Les alignements droits sont matérialisés par un trait de quelques centimètres, en rouge sur la photographie présentée **Figure 14**.

Figure 14 : Photographie du site de l'expérimentation devant l'agence Colas de Le Pouzin.

Afin de faire une comparaison des résultats, un lever du tracé est réalisé avec un GPS de topographie implémenté du réseau Teria. Les points des extrémités représentés sur la **Figure 14** sont identiques à ceux visibles sur le schéma représenté **Figure 15**. De plus, des points intermédiaires sont aussi matérialisés par des cercles blancs ou gris représentant des références qui permettent la comparaison avec notre protocole. Ces deux illustrations nous montrent l'environnement difficile avec la présence d'un bâtiment en proximité, d'une voie de chemin de fer et de silos.

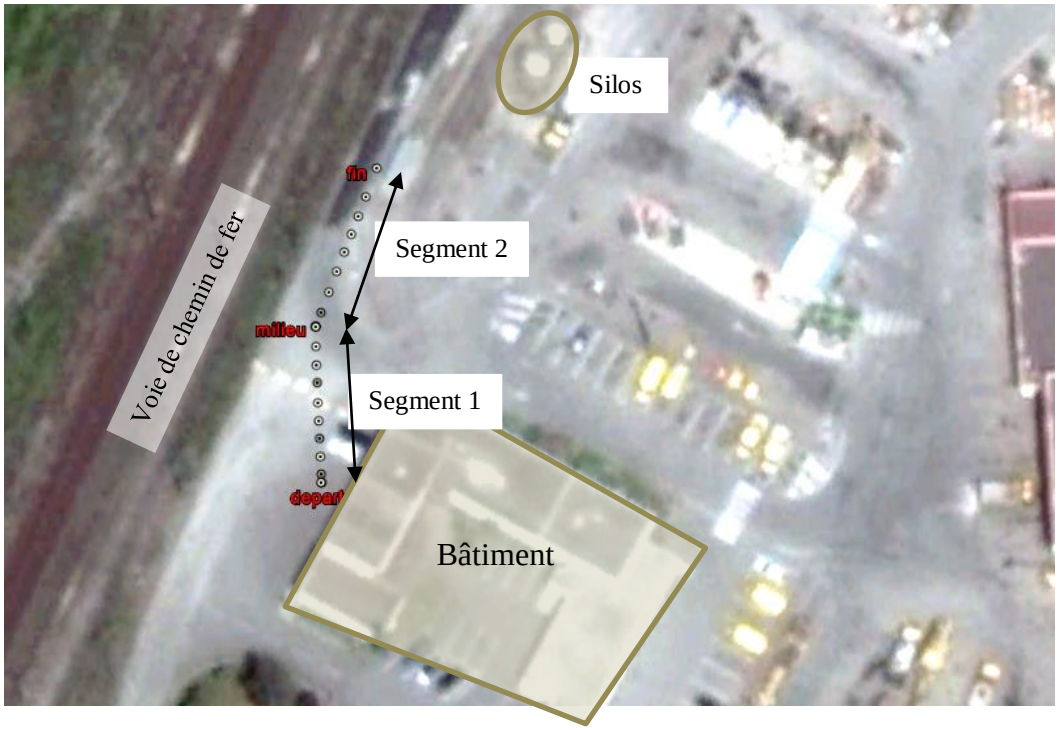


Figure 15 : Extrait d'une vue aérienne de l'agence Colas de Le Pouzin avec les points du tracé simulant un réseau (source : Google Earth)

Nous réalisons ce lever type et toutes les autres mesures nécessaires avec un smartphone Sony Xpéria Z1 compact (de 2014) sous la version 4.4 d'Android. Des applications gratuites ont été utilisées pour enregistrer les données brutes des capteurs, GPSLogger pour le GPS et AndroSensor pour les autres. Les données sont enregistrées à 20 Hz pour les capteurs utilisés par la biomécanique et à une mesure GPS par seconde. Ce choix fait suite aux caractéristiques des capteurs présentés dans le début de notre étude. Les différentes étapes sont détaillées dans la suite d'une part avec la calibration, d'autre part avec la méthode pour avoir la certification et enfin par les précisions attendues.

V.2 Les calibrations

V.2.1 Les composants : l'accéléromètre, le gyroscope et le magnétomètre

La présentation des composants de type MEMS a révélé la nécessité de les calibrer pour corriger à la fois les valeurs du biais et un facteur d'échelle. Dans notre étude, il faut utiliser des méthodes simples en topographie à mettre en œuvre, mais aussi accessibles à une entreprise non spécialisée. Les données utilisées sont soit brutes, soit déjà traitées par le système d'exploitation. De ce fait, il faut mettre en place les dispositifs de calibration (cf. ci-après) et réaliser des étalonnages de façon régulière. Pour l'accéléromètre, l'importance est moindre, car il est utilisé pour un traitement du signal afin de déterminer la fréquence de pas. Toutefois, des valeurs de meilleure qualité évitent des problèmes dans les calculs. Le principe consiste en la mesure d'accélération sur une surface horizontale et de façon immobile. Le nivellement d'une telle surface permet de concentrer toute la force d'accélération de gravité sur un axe unique. L'immobilisation du mobile ramène les deux autres axes à la valeur zéro. Cette manipulation mettra en lumière les biais sur les axes x et y, mais aussi le facteur d'échelle de l'axe z. Ces corrections mêmes incomplètes sont néanmoins les plus importantes. La fréquence de pas étant représentée en majeure partie sur l'axe z. De plus, c'est sur cet axe que les valeurs d'accélération sont les plus fortes et donc l'impact du facteur d'échelle le plus important.
Ensuite, la donnée capitale est l'orientation. Celle est issue d'un calcul opaque combinant tous les capteurs. Il est obligatoire de connaître le décalage au Nord. Pour ce, il faut mettre en place un protocole de mesure à l'abri de toutes perturbations magnétiques. Nous mesurons avec le smartphone suivant deux directions connues, mais dans les deux sens. En effet, dans le traitement du cap, expliqué par la suite, une moyenne de cap aller et retour sera effectuée. La réalisation de plusieurs calibrations nous a révélé un décalage par rapport au zéro négligeable. Cependant, un facteur d'échelle sur les valeurs moyennées est déterminé. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Capteur		**Erreur de biais**	**Correction d'Échelle**
Accéléromètre	Axe x	0.357 m/s²	
	Axe y	0.097 m/s²	
	Axe z		1.0236
Orientation	Cap (z)		0.9843
	Roll (y)	-2.20 °	
	Pitch (x)	-0.59 °	

Tableau 6 : Tableau récapitulant les valeurs de calibration du smartphone.

Nous constatons des décalages assez importants. La détermination des biais est réalisée à l'aide d'un plan horizontal. Ce type de matériel n'est pas disponible dans toutes les agences, donc difficile à mettre en œuvre. Cependant, ces valeurs ne sont pas nécessaires pour les calculs envisagés. La calibration des facteurs d'échelle est en revanche essentielle. La correction est différente de 1 de 2-3 % comme présentée en dernière colonne du **Tableau 6**, ce qui n'est pas négligeable. Ce test est à réaliser très régulièrement si le smartphone est soumis à des forts champs magnétiques qui pourraient dérégler le Cap.

V.2.2 La longueur du pas

La description vue dans les parties précédentes sous-entend la connaissance de la longueur d'un pas. Les paramètres de la formule 9 sont nécessairement propres à chaque utilisateur, et surtout déterminés en amont du lever. De ce fait, l'équation peut être adaptée dans notre cas pour devenir :

$$Dpas = \mathrm{h} \times \mathrm{a} \times \mathrm{f} + \mathrm{d} \qquad (17)$$

avec a et d les paramètres à étalonner.

Le processus d'étalonnage doit réunir des conditions similaires à celles du terrain. La calibration consiste à marcher entre deux points connus à 5 cm près sur la distance. Afin de déterminer des coefficients représentatifs, il est nécessaire de réaliser un grand nombre de trajets.

Dans le cadre de l'expérimentation du protocole, un étalonnage indépendant du lever a été réalisé. Les quatre trajets pour la détermination des paramètres sont assez faibles. Cependant le terrain tout comme la fréquence de marche étant similaire au test, la calibration nous permet de déterminer les valeurs, mais aussi d'avoir des écarts sur la longueur du pas. Les résultats du calcul par moindres carrés sont récapitulés dans le **Tableau 7** :

N° du trajet	Distance théorique (m)	Fréquence (pas/s)	Écart entre la longueur de pas issue des paramètres et la longueur théorique (m)	Paramètre
1	54.50	1.5332	-0.0011	a= 0.2244 d= 0.1330
2	54.50	1.4941	0.0016	
3	54.50	1.4160	0.0050	
4	54.50	1.4160	-0.0055	

Tableau 7 : Tableau sur la calibration des paramètres de marche d'un utilisateur.

La calibration montre tout d'abord un écart inférieur à 1cm pour la longueur du pas. Celui-ci est primordial, car cela montre la bonne qualité de la valeur des coefficients. Ensuite, la distance choisie correspond à environ 75 pas, permettant une analyse du signal minimisant l'influence des perturbations ponctuelles sur la fréquence.

V.3 La méthode de lever

Le processus de calculs mentionnés plus haut contraint à une certaine rigueur et méthodologie sur le lever. En amont, il est obligatoire d'avoir sur le chantier au moins un point connu dans le système de coordonnées légales. Cette contrainte est directement liée à la puce A-GPS du smartphone qui pour rappel de la partie II.1, a une précision de 3 m dans le meilleur des cas. Ensuite, il est incontournable d'avoir préalablement fait les calibrations précédemment décrites. Une fois ces étapes achevées, nous pouvons passer au principe de lever. Durant toutes les manipulations, l'appareil doit être dans la main et le plus horizontal possible.

- **Initialisation**

La première étape est celle de la mise en route des composants et donc de leur initialisation. Le positionnement satellitaire, entre le temps de fix et de stabilisation autour d'une valeur, nécessite un minimum 30 secondes. Concernant la centrale inertielle, il faut juste un temps très faible de stabilisation sur un point et sans perturbation magnétique. Ensuite, un premier test est nécessaire avant de commencer. Il est impératif de faire un tour complet sur soi pour contrôler que l'angle du cap fonctionne correctement. Cette étape se termine par un alignement de l'axe y du smartphone avec le réseau à lever. Positionné à une hauteur constante et à la verticale du réseau, le dispositif reste 10 secondes immobile.

- **Lever d'un alignement droit**

À ce stade, l'utilisateur peut commencer à marcher tout en gardant le smartphone dans la direction du réseau et le plus horizontal possible. La cadence de marche doit être régulière et la plus proche d'un pas par seconde. Cette fréquence permet d'obtenir une mesure GNSS pour chaque pas. La direction du dispositif de mesure est capitale, car c'est elle qui va donner la direction des pas. Ensuite, la contrainte d'un alignement droit vient de la présence de bruit trop important sur l'accéléromètre qui est pris en compte dans la détermination du cap. De ce fait, il faut éviter de tourner en marchant.

- **Le changement de direction**

Les réseaux sont amenés à faire des trajets non rectilignes. Dans ce cas, quand l'opérateur arrive sur un changement de direction, il convient d'adopter un protocole spécifique. Tout d'abord, il doit effectuer un arrêt avec immobilisation d'une quinzaine de secondes du smartphone. Ensuite, il doit tourner sur lui-même, en minimisant le déplacement de l'utilisateur, pour mettre le dispositif de mesure dans la nouvelle direction. Enfin, avant de repartir lever un autre alignement, l'opérateur doit s'immobiliser mesurant encore quinze secondes environ.

Le lever du réseau doit être réalisé en cheminement aller-retour ou en boucle fermée si l'on dispose de plusieurs points de référence pas trop éloignés.

Ces étapes permettent non seulement de minimiser les erreurs, mais aussi de réaliser des moyennes à partir des calculs. La mise en place d'un tel dispositif a pour objectif de réaliser un géoréférencement dans les précisions de la DT-Dict. De plus dans cette législation, il est question de certification de l'opérateur. L'entreprise grâce aux manipulations de calibration et au respect de la procédure de lever peut certifier les hommes habilités à relever les réseaux.

En suivant les deux parties précédentes, un test a été réalisé et nous allons présenter les résultats et analyses dans la suite de notre étude.

VI Résultats et analyses

Nous allons analyser dans cette partie les résultats issus de l'expérimentation présentée dans la partie V suivant les processus décrits jusqu'ici. Ces résultats sont issus des programmes réalisant les traitements expliqués précédemment.

VI.1 Les données brutes

L'analyse des signaux bruts est importante pour déterminer les différentes phases, les périodes immobiles et les périodes de marche. Ce traitement est important pour permettre d'une part la synchronisation des données et d'autre part d'adapter le traitement aux zones.

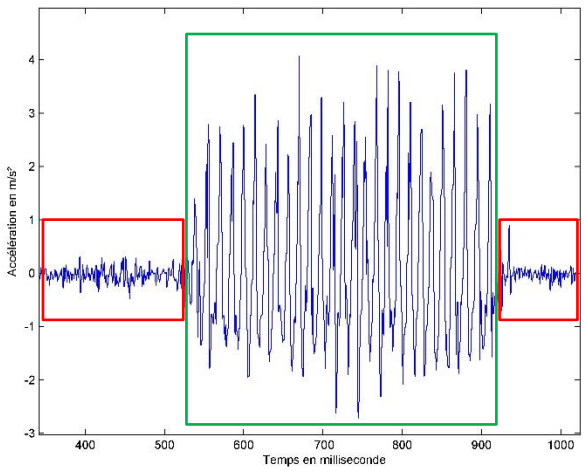


Figure 16 : Extrait d'une partie de la mesure de l'accélération sur l'axe z en fonction du temps. La zone rouge est le mode arrêté et la verte le moment de marche.

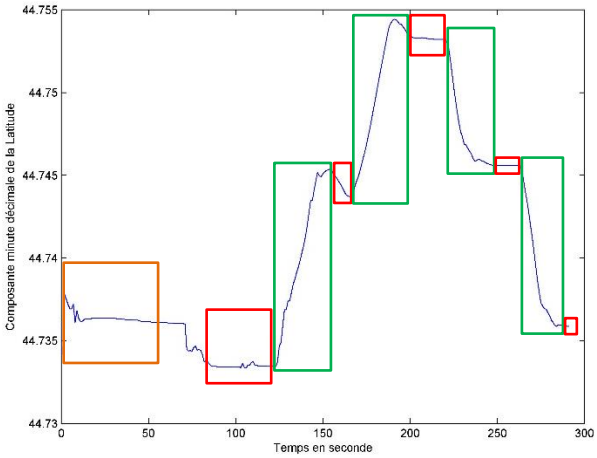


Figure 17 : Extrait de la latitude sur l'ensemble du parcours en fonction du temps. La zone orange correspond à l'initialisation, les zones vertes sont les moments de marche et les rouges les immobilisations.

La détermination des différentes zones est facilement réalisable grâce aux périodes d'immobilité. Il est encore plus important de marquer ce changement de rythme pour le système de l'accéléromètre. En effet, la détermination du temps de marche est cruciale pour appliquer le bon nombre de pas effectués. Ce constat est bien illustré avec les zones rouges représentant les zones stables qui présentent de légères ondulations à comparer de la période active sur le graphique la **Figure 16**. Une autre remarque peut se faire avec le GPS. La convergence est plutôt rapide dans notre cas avec moins de 20 secondes. La partie entre la zone orange et la zone rouge sur le graphique de la **Figure 17** correspond au déplacement sur le point de référence.

Nous allons à présent analyser l'orientation et les dernières valeurs issues des capteurs, présentes sur la **Figure 18**.

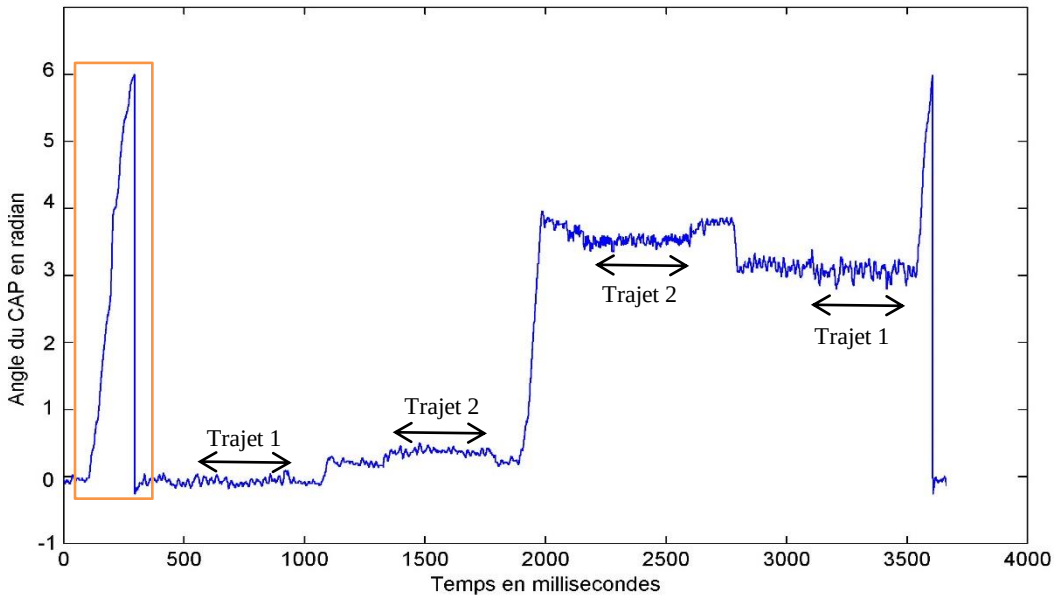


Figure 18 : Graphique des mesures de l'azimut au cours du temps pendant la durée de l'expérience.

Nous remarquons que le protocole a bien été respecté avec dans la zone orange l'initialisation. Le cap fait bien un tour complet et revient sur sa valeur de début. Ensuite, nous constatons des caps assez constants pendant la mesure des réseaux. Le graphique nous révèle aussi des valeurs de cap complémentaires traduisant le trajet retour. Le dernier point est sur le comportement du cap à l'arrivée. L'utilisateur a effectué un contrôle en réalisant un tour sur lui-même. Le résultat semble plutôt encourageant avec une valeur de fin proche de celle du départ.
Un point important est à souligner : pendant le parcours nous pouvons voir qu'il n'y a pas eu de perturbation magnétique influençant le cap.

VI.2 Les résultats préliminaires

Le couplage étant effectué sur des résultats de calculs de coordonnées comme expliqués dans le paragraphe IV.1.1, nous allons les présenter dans le paragraphe ci-après.

VI.2.1 Géoréférencement GNSS

Les coordonnées géographiques sont converties en Lambert 93 du système RGF93 et en altitude NGF/IGN69. Cette projection étant le système légal Français, elle convient parfaitement aux exigences de la DT-Dict. La transformation est mathématique et ne dégrade pas la précision des points. Le mouvement ainsi que la présence d'un masque au sud, regroupe des conditions réelles, mais pas optimales pour le GNSS. De ce fait, le positionnement oscille entre 3 et 12 mètres d'écart type. Pour la suite de notre processus, la variance sera fixée à 150 m².

VI.2.2 Positionnement issu de la biomécanique

En comparaison au paragraphe précédent, cette détermination demande plus de calculs comme décrits dans la présentation du couplage.

Tout d'abord, les paramètres issus de la calibration ainsi que la fréquence déterminée pour chaque tronçon permettent de déterminer la longueur d'un pas (Dpas). Un récapitulatif des valeurs figure dans le **Tableau 8** :

N° de segment	Fréquence (Hz)	Dpas (m)	Dpas théorique (m)	Écart (m)
1	1.4258	0.7105	0.710	0.0005
2	1.4063	0.7026	0.689	0.0136
2 retour	1.4111	0.7046	0.721	-0.0164
1 retour	1.4209	0.7085	0.705	0.0035

Tableau 8 : Tableau représentant les caractéristiques de marche pendant le lever de réseau.

D'après ce test, nous constatons que la fréquence varie peu suivant les parcours avec moins de 1.4 %. Il est en même avec la longueur d'un pas. Toutefois, les écarts constatés se révèlent assez fort en proportion avec plus de 2.2 %. Sur la distance d'environ 20 m, 2 cm sur une trentaine de pas engendrent une incertitude de 0.60 m. Nous voyons ici l'importance de la bonne détermination des paramètres a et d pendant la calibration. De plus, la qualité de détermination du temps de parcours donc, du calcul du nombre de pas est déterminante sur le positionnement. Une erreur de 1 pas se traduit par une erreur directe de 0.70 m. Dans notre cas, le tableau révèle un écart maximum de 1.6 cm sur la longueur de pas qui est donc important.

L'autre donnée en entrée est l'azimut. Comme vu sur la **Figure 15**, nous avons un cap aller et un cap retour. Ces deux angles sont théoriquement égaux modulo π. Afin de minimiser les erreurs, nous calculons une moyenne qui nous permet de créer une correction angulaire. L'imprécision angulaire estimée à partir de plusieurs essais sur une direction connue est de 2°. En transposant ceci en écart planimétrique à 20 m, cela nous conduit à un écart type de 0.70 m. La correction issue de la calibration représente 1.5 % soit pour un cap de 160° un écart de 2.4°. Cette correction représente à 20 m un décalage de 0.85 m. Nous voyons ici l'importance de la calibration du cap.

VI.2.3 Conclusion

Les positions qui serviront à la fusion par le filtre de Kalman ont bien des propriétés différentes. Nous sommes certes en présence de précisions bien insuffisantes dans chacun des cas. Cependant, le positionnement GPS reste constant au cours du temps et de la distance, mais à plusieurs mètres. Quant à l'autre, il est juste de 1 m (pour 20 m), mais l'imprécision va croître en fonction de la distance. La fusion est le moyen mis en œuvre pour arriver à l'objectif de cette étude.

VI.3 Résultat du GPS/biomécanique

Nous allons présenter les résultats du géoréférencement du réseau simulé présenté auparavant.
Les figures placées sur la page suivante représentent la position vraie déterminée par le réseau Teria comparé avec le GNSS du smartphone pour la **Figure 19** et le positionnement biomécanique pour la Figure 20.

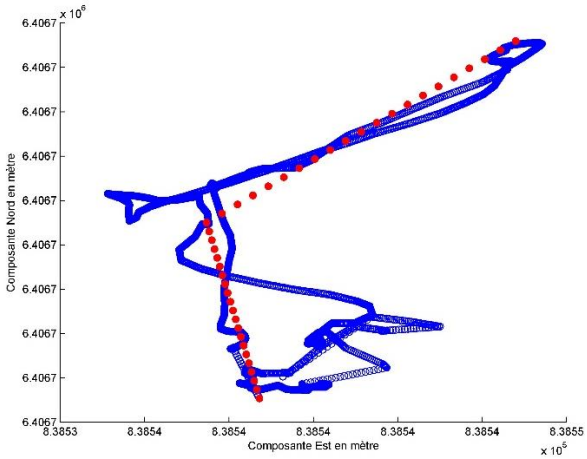


Figure 19 : Graphique des points issus du lever par le GNSS du smartphone. L'axe vertical n'a pas la même échelle que l'axe horizontal.

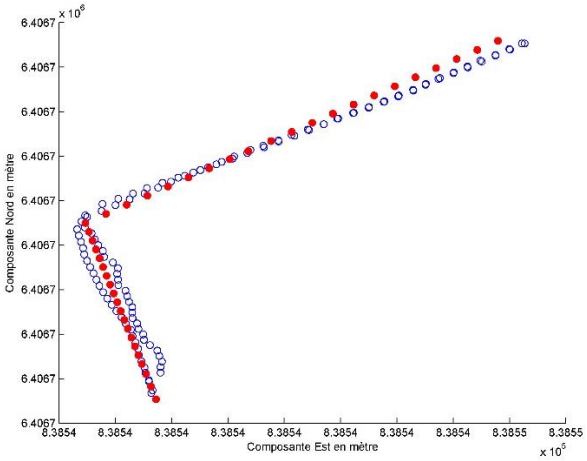


Figure 20 : Graphique des points issus du lever par les pas avec le cap du smartphone. L'axe vertical n'a pas la même échelle que l'axe horizontal.

Conformément aux paragraphes précédents, l'on constate bien le caractère aléatoire de GPS, mais borné à environ 15 m. Dans la fenêtre de droite, l'on peut voir l'impact de la mauvaise estimation du pas, mais aussi le décalage de l'angle avec les points bleus qui s'éloignent de plus en plus en avançant.

Maintenant, le graphique suivant révèle le résultat de la fusion de ces deux par le filtre de Kalman mis en place dans la partie IV avec la correction de fermeture appliquée.

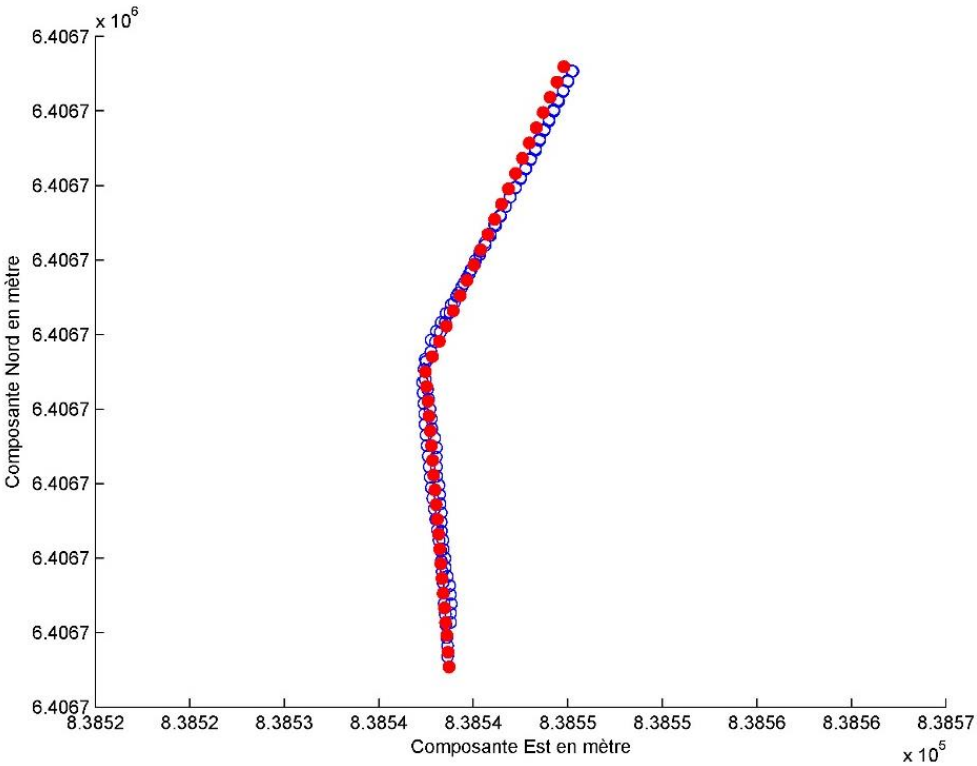


Figure 21 : Résultat de l'hybridation en coordonnée Lambert 93.

La **Figure 21** montre un lissage des erreurs avec une nette amélioration du positionnement. Les écarts sur le point de milieu moyenné sont de 59 et 13 cm et de 24 et 28 cm sur le dernier point. La fusion a bien produit l'effet recherché. Sur le graphique de la **Figure 21**, nous voyons bien l'influence des différentes données traduites par une ondulation des points quand le GNSS fournit des résultats de qualité moindre. Nous remarquons que sur le dernier point les écarts en position sont inférieurs à celui du milieu. Ce phénomène de bornage de l'écart visible sur la **Figure 22** et la **Figure 23** reflète bien le comportement du GNSS. Notre expérience valide le gain apporté par le protocole de fusion. Il met aussi en lumière l'importance de la calibration. Le cap est paramètre qui montre une influence importante sur la **Figure 20** et la **Figure 21**. Cependant, nous voyons un manque de précision du positionnement satellitaire qui ne permet pas de corriger cette déviation de l'azimut. Le graphique nous présente un autre aspect du lever : la cohérence de l'ensemble des points. Le lever étant fait en dynamique, nous avons en résultat une trace du réseau. Or, comme l'illustre la **Figure 19**, le positionnement par satellite est très hétérogène. Un point peut être à 3 m et un autre à 12 m. Le gain obtenu par l'hybridation est non seulement visible sur les points de changement de direction, mais aussi sur les autres qui composent les segments. Il y a là une cohérence tout au long du lever permettant une utilisation complète de la trace et non seulement des points des extrémités. Les écarts représentés sur la **Figure 22** et la **Figure 23** montre bien une limite à l'erreur. Nous pouvons aussi voir la propagation de l'erreur due à l'orientation ou la longueur de pas sur les différents segments avec des changements brutaux de la pente de la courbe des écarts. Ce constat conforte l'analyse faite sur les deux points de référence avec un écart borné au cours du temps.

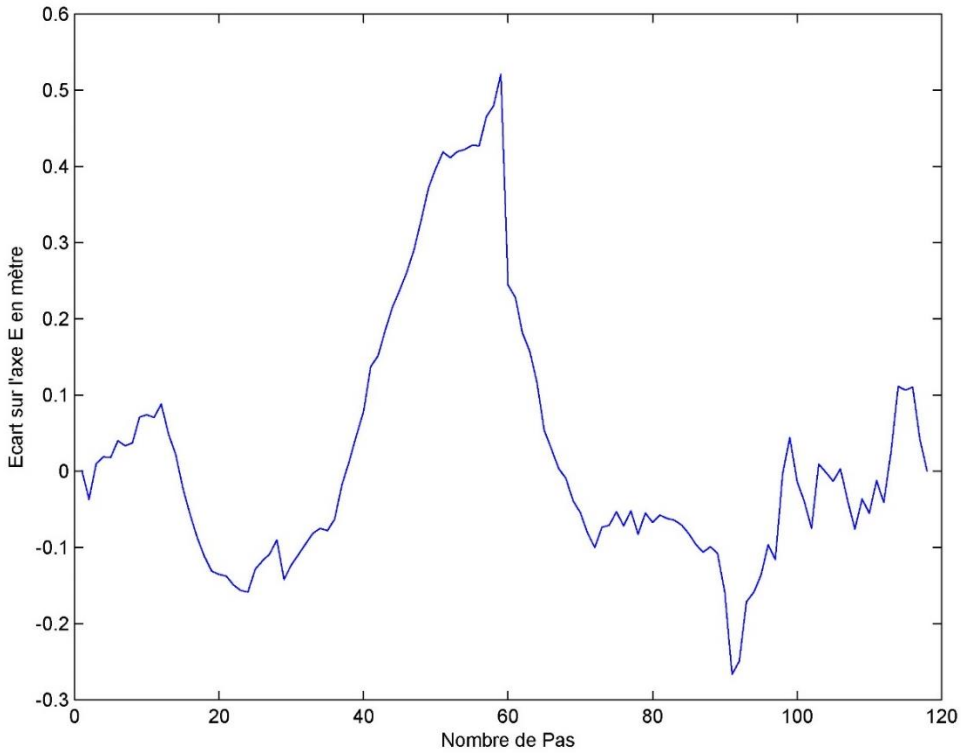


Figure 22 : Graphique représentant les écarts entre la position hybride et la référence sur la composante Est en mètre.

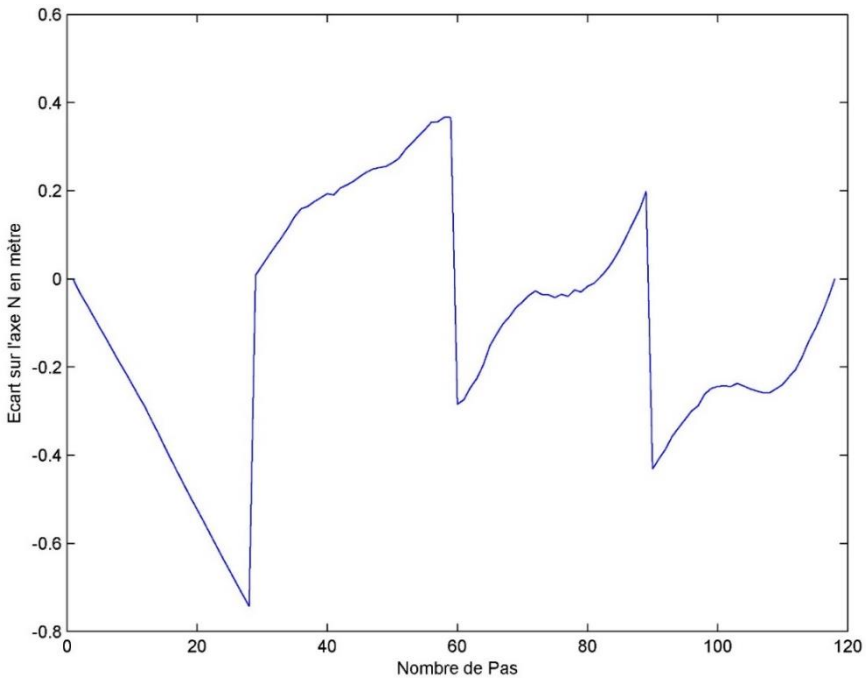


Figure 23 : Graphique représentant les écarts entre la position hybride et la référence sur la composante Nord en mètre.

Le nombre de tests se résumant à celui-ci, nous ne pouvons pas parler d'écart type ou de classe de précision à ce stade. Cependant, sur l'ensemble du parcours tous les points sont à moins de 75 cm et nous constatons que 95 % des points sont inférieurs à 60 cm.

Enfin, notons une précision importante : les résultats présentés sont en planimétrie. Concernant l'altimétrie, nous utilisons seulement les données provenant du module GNSS. Le résultat est donc entre 3 et 15 mètres.

Dans le cadre de notre objectif, le positionnement sur cet axe est crucial. Or, l'hybridation mise en place ne permet pas la fusion de plusieurs données sur la composante verticale. Il est nécessaire d'apporter des informations supplémentaires pour réduire cette imprécision.

VI.4 Une évolution matérielle pour la composante altimétrique

Notre étude sur les smartphones a révélé un nouveau capteur dans les smartphones de 2015. Les constructeurs ont intégré tout récemment un baromètre. Cette évolution trop récente ne permet pas d'être intégrée dans le protocole. Cependant, le prêt de l'iPhone 6 a permis de faire quelques tests sur des mesures.

Dans le principe, le capteur déduit de la différence de pression une variation d'altitude. Dans la théorie, il est même possible d'obtenir la valeur absolue de cette composante, mais il est nécessaire de calibrer très régulièrement (plusieurs fois par semaine).

Dans notre cas, le protocole permet de calibrer le baromètre à chaque début de lever. Cependant, seule la mesure en relatif nous intéresse. Nous avons donc mis en place un test sur le trajet décrit précédemment. Le smartphone est initialisé sur un point avec un temps de démarrage de 30 secondes. Ensuite, les deux autres points ont été mesurés. Les valeurs du baromètre correspondent à l'altitude, alors que celle de référence à la hauteur ellipsoïdale. Le **Tableau 9** récapitule les données.

Point	Pression (hPa)	Mesure du smartphone (m)	Hauteur de référence (m)	Écart sur la dénivelée par rapport au point « Début » (m)
Début	1008.25	89.6	143.83	
Milieu	1008.19	90.1	144.01	0.32
Fin	1009.14	90.5	144.31	0.42

Tableau 9 : Tableau reprenant les résultats du baromètre de l'iPhone 6.

Nous remarquons un décalage important sur le point d'initialisation. Ce phénomène est normal. D'une part, car nous ne sommes pas dans le même système, il y a donc un décalage d'environ 49 m entre les deux. D'autre part, le capteur comme le préconise le constructeur nécessite des calibrations régulières. Les variations de pression correspondent exclusivement à la dénivelée si le changement de climat est faible donc il est important de faire les mesures sur un intervalle de temps le plus court possible. En effet, des changements de climat au cours de la journée perturberaient les mesures. Ce problème ne semble pas être une contrainte forte au vu du protocole de lever mis en place dans notre étude.
Ensuite, nous constatons un résultat assez encourageant sur les points mesurés. En effet, les écarts avec les points de référence sont au maximum de 42 cm. Nous sommes homogènes aux précisions planimétries. L'incorporation de ces nouvelles données dans le processus d'hybridation apporterait la modification de l'équation (14) comme suivant :

$$Z_k = \begin{bmatrix} X_{gps} - X_{Biom} \\ Y_{gps} - Y_{Biom} \\ Z_{gps} - Z_{Biom} \end{bmatrix}_k$$

Toutefois, un traitement préalable est nécessaire pour transformer les valeurs verticales en altitude NGF/IGN69.

VI.5 En résumé

Notre étude a mise en place un protocole d'assemblage de données issues de capteurs différents et une méthode de lever spécifique. De ce fait, le test expérimental mis en place a eu un double objectif, à la fois de valider la procédure de fusion, mais aussi la méthode de lever. Les résultats sont la traduction d'un lever de deux segments de 20 m environ. La comparaison avec une solution de référence a permis de montrer le gain produit par l'hybridation GNSS/biomécanique, mais aussi par la procédure de lever. La contrainte de 40 cm n'est certes par encore atteinte en planimétrie, mais s'en approche. Les résultats à moins de 60 cm sur les composantes Nord et Est sont très encourageants pour l'avenir.
Cependant, les résultats nous montrent aussi une lacune sur la composante verticale provenant d'une déficience de données. La constante évolution des technologies couplées avec un prix en baisse incite les constructeurs à mettre encore plus de composants. Par conséquent, les nouveaux smartphones embarquent aujourd'hui et surtout dans l'avenir des baromètres. Ce nouveau capteur permet d'obtenir des informations sur la dénivelée. Les premiers essais réalisés sur notre trajet expérimental révèlent un fort potentiel avec des précisions propres de moins de 0.5 m. Il reste encore des recherches très prometteuses à mener sur ce terrain afin de valider les objectifs de la DT-Dict.

VII Perspectives

Au cours de l'étude, de nouvelles idées de recherche ont jailli. Dans cette partie, nous essayons de présenter ces perspectives dans le géoréférencement des réseaux via smartphone.

Tout d'abord, nous avons juste présenté le baromètre dans la détermination de la composante verticale. L'implantation de ce nouveau capteur dans les smartphones est déterminante dans le positionnement vertical. Cependant, de par la récente utilisation de celui-ci, nous n'avons pas pu l'utiliser dans notre couplage. Il serait nécessaire d'étudier une possible calibration, mais surtout sa complète intégration dans le processus de calculs. Il faudrait aussi adapter le protocole de lever pour une bonne utilisation du baromètre.
Ensuite, pendant les différentes acquisitions de données, nous nous sommes aperçus que l'application du GPS nous informait de la précision du positionnement. Or, cette donnée ne figure pas dans la trame NMEA. Il semblerait judicieux de vérifier la qualité de celle-ci afin de l'utiliser dans le filtre de Kalman. En effet, la fusion pourrait faire évoluer la variance du positionnement issu du GNSS afin de l'exploiter au mieux suivant les conditions de lever. La qualité des coordonnées pouvant varier de 2 à 20 m, le gain sur le couplage par l'adaptation en temps réel de la variance serait important.
L'étude nous révèle l'importance de la calibration dans le cas d'utilisation des composants MEMS. Les protocoles mis en place sont indispensables dans l'obtention de meilleurs résultats. L'amélioration et l'approfondissement de la procédure de calibration du cap seraient deux éléments nécessaires pour améliorer le géoréférencement. Une étude du comportement de ce capteur résultant de l'assemblage des trois autres pourrait déterminer une calibration plus fine et adapter aux erreurs de biais.
L'autre calibration importante concerne la détermination des paramètres de marche. Afin d'affiner le résultat, la longueur de pas est très influencée par le terrain. La formule reliant le pas à la taille et la fréquence de marche pourrait se voir modifier en fonction de la pente du terrain. Des tests dans cette direction seraient un moyen de limiter l'erreur sur cette donnée et de s'adapter au mieux aux conditions du terrain.
Toutes les informations évoquées au cours du travail sont reliées par une bonne synchronisation du temps. Sur ce point aussi des perspectives d'amélioration pourraient être à l'étude. Un travail sur une meilleure synchronisation des capteurs et sur la détermination des différents moments permettrait l'application des calculs sur les bons intervalles. L'interface utilisateur de l'application du smartphone pourrait être une piste à explorer. L'*ANNEXE 3* qui reprend les idées principales de l'interface et des fonctionnalités à l'issue de ce travail pourrait servir de point de départ du développement.
Enfin, la problématique de géoréférencer les réseaux par smartphone ouvre de multiple possibilité de traitement. En effet, le condensé de technologie que représente cet appareil et sa popularité lui permettent un développement perpétuel. Ainsi, la présence de capteur photo et vidéo de qualité pourrait ouvrir à de nouveaux horizons de recherche. Une solution de géoréférencement par traitement des images ou d'un flux vidéo pourrait représenter un complément à la solution de cette étude. Cette approche photogrammétrie combinée aux autres solutions pourrait nous classer dans une précision inférieure à 40 cm comme le requière la DT-Dict.

Conclusion

Il est bon de rappeler le contexte de ce travail de fin d'études. Ce projet vient en réponse à un problème de géoréférencer les réseaux en tranchée ouverte via smartphone tout en respectant la législation française imposant une précision de 40 cm. Certes, aujourd'hui, grâce au développement des technologies et à la démocratisation de la miniaturisation des composants, le smartphone est un appareil commun et très complet. Dans l'esprit, le nombre de chantiers en simultané ne permet pas un géoréférencement en tranchée ouverte avec un appareil de topographie sans un coût exorbitant.
Dans le principe, le smartphone avec la présence de nombreux capteurs tels que le GPS, l'accéléromètre, le gyromètre et le magnétomètre est capable de déterminer sa position. Maintenant, tous ces composants MEMS sont de qualité faible. Le principe est de combiner à l'aide du filtre de Kalman ces différentes données afin de produire une solution conforme aux prescriptions de la DT-Dict.
Tout d'abord, les recherches sur les capteurs constituant le smartphone ont révélé la trop faible qualité pour une utilisation topographique. Les dérives et les biais résultant des capteurs inertiels ne permettent pas d'utiliser les données brutes. De plus, le positionnement absolu de la puce A-GPS est aussi très insuffisant avec dans le meilleur des cas une précision de 2 m. La calibration des capteurs, mais aussi de leur fusion se révèle indispensable.

Les différentes expériences nous ont conduits à un couplage entre le GNSS et la longueur des pas avec l'azimut. Au vu des données mises à disposition, le couplage sera fait avec un filtre de Kalman sur les deux coordonnées.
Nous avons en premier lieu mis en place des méthodes de calibration sur la détermination de la distance de pas. Les travaux sur la biomécanique ainsi que les tests nous permettent de relier la taille d'un utilisateur avec la fréquence et deux paramètres à la longueur d'un pas. Après, la détermination d'un facteur d'échelle sur le cap est effectuée.
De plus, nous avons mis en place une méthodologie de lever. Cette procédure a un double objectif, permettre l'acquisition de données dans les meilleures conditions, mais c'est aussi un outil de certification des travaux réalisés. En effet, la législation demande une certification du personnel qui réalise le géoréférencement.
La combinaison de ces données permet ainsi l'obtention du premier jeu de coordonnées.

Ensuite, un travail de transformation des coordonnées du GPS dans le système Lambert 93 du RGF93 est effectué. Ce calcul nous produit le deuxième jeu de coordonnées dans le même système que le précédent.

Maintenant que nous avons à notre disposition deux déterminations de la position d'un point, le filtre de Kalman peut être mis en œuvre pour réaliser la fusion. La valeur de variance pour le GNSS est assez élevée, car les conditions ne sont pas très bonnes. Cela implique une possible détermination assez loin de la réalité. Concernant l'autre, elle est dépendante de la distance parcourue.

Dans un autre temps, un protocole expérimental pour tester le processus dans son ensemble est réalisé. L'objectif est multiple avec une validation des méthodes, mais aussi des précisions en conditions réelles. Pour réaliser ce test, un réseau est simulé

à l'aide de segment droit tracé sur le sol. La longueur d'environ 20 m correspond à un réseau humide moyen. Un lever par GPS de topographie est effectué et servira de référence.

Les résultats préliminaires des deux positionnements avant couplage sont de qualité métrique conformes aux attentes. La fusion révèle des résultats encourageants avec un géoréférencement borné à moins de 60 cm en planimétrie. La procédure de lever se révèle indispensable pour le traitement et contribue aussi à de tels résultats. Un constat est cependant inévitable. Le comportement sur la composante verticale est celui du GPS, donc insuffisant.
Un début de solution nous est venu de l'avancement des technologies avec la présence d'un nouveau capteur, le baromètre. De par la nouveauté et le manque de temps, seuls des tests ponctuels ont pu être réalisés. Le résultat est très encourageant pour l'avenir avec une détermination à moins de 50 cm.

La volonté des constructeurs à doter leurs appareils de plus en plus de puissance et de polyvalence comme par l'arrivée du baromètre nous insuffle à un avenir prometteur. Des perspectives sont nées au cours de cette étude avec la prise en considération des nouveautés matérielles. Dans la continuité, des pistes de recherche sont possibles dans l'amélioration des protocoles mis en place. La présence de capteur comme l'appareil photo sont autant de possibilités d'évolution pouvant amener à un géoréférencement des réseaux conformément à la DT-Dict.

Ainsi, la simplicité et l'accessibilité du smartphone répondent à la demande de l'entreprise. De plus, le succès des smartphones incite les fabricants à toujours vouloir en faire davantage permettant à ce projet de voir un avenir prometteur. D'autres secteurs d'activité sont aussi très impliqués dans le positionnement précis du smartphone repositionnant le projet avec une ampleur bien au-delà du monde de la topographie. Le géant Apple a par exemple fait l'acquisition récente de start-up dans le domaine du positionnement GNSS. Ensuite, des organismes comme l'Agence Spatiale Européenne avec leurs services EGNOS-SDK[6] se positionnent aussi sur le sujet.

Cette étude fut l'objet d'un travail de recherche complexe, mais très enrichissant. L'avenir de ce projet est prometteur dans un monde ou le SIG prend de l'ampleur. À travers ce travail, le lien étroit entre le monde de la topographie et des nouvelles technologies nous révèle un tournant dans les méthodes de lever. Le besoin de rapidité et de connaissance invite de nouvelles techniques dans le métier comme le positionnement dynamique.

[6] EGNOS-SDK : European Geostationary Navigation Overlay Service : Service Européen de Navigation par Recouvrement Géostationnaire. Ce service est sur le projet EGNOS-SDK, un service de positionnement de smartphone amélioré (source : egnos-portal.gsa.europa.eu/developer-platform/egnos-toolkits/egnos-sdk).

Bibliographie

[1] **GROVES Paul D, 2008**. *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*. ISBN-13:978-1-58053-255-6. Artech House, United States of America, 505p.

[2] **The Institute of Electrical and Alectronics Engineers, 2008**. *Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros*. ISBN 1-55937-961-8. United States of America, 77p.

[3] **PIETRERA Laurent, 2013**. *Problématique du géoréférencement dans le domaine de la détection de réseaux*. TFE, ESGT, 52p.

[4] **MARCHAND Camille, 2014**. *Evaluation d'une solution de référence autonome pour la navigation pédestre dans les bâtiments* [En ligne]. PFE, INSA Strasbourg, 69p. Disponible sur : < eprints2.insa-strasbourg.fr/1789/1/Rapport_PFE_MARCHAND_Camille.pdf > (consulté le 2/06/2015).

[5] **DEMEULE Vincent, 2013**. *Estimation des déplacements des piétons à partir des mesures inertielles et GPS d'un smartphone* [En ligne]. TFE, ESGT, 49p. Disponible sur : < dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00920114 > (consulté le 2/06/2015).

[6] **BONNAZ Jean-Marie, 2007**. *Analyse du comportement de capteurs inertiels en trajectographie*. TFE, ESGT, 43p.

[7] **LAVOIE Philippe, 2012**. *Système de navigation hybride GPS/INS à faible coût pour la navigation robuste en environnement urbain* [En ligne]. Mémoire, Ecole de Technologie Supérieure de l'Université du Québec, 314p. Disponible sur : < www.researchgate.net/publication/236658166_Systme_de_Navigation_Hybride_GPSINS__Faible_Cot_Pour_la_Navigation_Robuste_en_Environnement_Urbain > (consulté le 2/06/2015).

[8] **MOREL Laurent, 2014**. Géodésie. Support de cours, ESGT.

[9] **EVRARD Loïc, 2014**. *Projet de géoréférencement des ouvrages de réseau électrique*. TFE, ESGT, 66p.

[10] **HAIYING Hou, 2004**. *Modeling Inertial Sensors Errors Using Allan Variance* [En ligne]. These, University of Calgary, 128p. Disponible sur : < www.ucalgary.ca/engo_webdocs/NES/04.20201.HaiyingHou.pdf > (consulté le 2/06/2015).

[11] **CHAUVEAU Guillaume, 2014**. *Apport du filtre de Kalman aux systèmes de positionnement embarqués et à l'auscultation* [En ligne]. TFE, ESGT, 82p.

[12] **ZEGARRA FLORES Jesus Victor, 2013**. *Contribution aux aides à l'orientation des déficients visuels par GPS, magnétomètre, baromètre et centrale inertielle* [En ligne]. Thèse, Université Paris Sud XI, 180p. Disponible sur : < tel.archives-ouvertes.fr/tel-00919778 > (consulté le 2/06/2015).

[13] **SHALA Ubejd, RODRIGUEZ Angel, 2011**. *Indoor Positioning using Sensor-fusion in Android Devices* [En ligne]. These, Kristianstad University, 51p. Disponible sur : < hkr.diva-portal.org/smash/get/diva2:475619/FULLTEXT02.pdf > (consulté le 2/06/2015).

[14] **RENAUDIN Valérie, 2007**. *Hybridization of MEMS and Assisted GPS for Pedestrian Navigation*. InsideGNSS [En ligne]. **Janvier/Février 2007**.
Disponible sur : < infoscience.epfl.ch/record/100277/files/IGM0207_Renaudin_WM.pdf > (consulté le 2/06/2015).

[15] **AYUB Shahid, BAHRAMINISAAB Alireza, HONARY Bahram, 2012**. À Sensor Fusion Method for Smart phone Orientation Estimation [En ligne].
Disponible sur : < www.cms.livjm.ac.uk/pgnet2012/Proceedings/Papers/1569603133.pdf > (consulté le 2/06/2015).

[16] **FLYER_BMG160**. In : BOSCH. [En ligne].
Disponible sur : < *ae-bst.resource.bosch.com/media/products/dokumente/bmg160/bst-bmg160-fl000-01_2012-09.pdf* > (consulté le 2/06/2015).

[17] **BMA250 data sheet**. In : BOSCH. [En ligne].
Disponible sur : < *ae-bst.resource.bosch.com/media/products/dokumente/bma250/bst-bma250-ds002-05.pdf* > (consulté le 2/06/2015).

[18] **AK8963**. In : AsahiKASEI. [En ligne].
Disponible sur : < *www.akm.com/akm/en/file/datasheet/AK8963.pdf* > (consulté le 2/06/2015).

[19] **Xperia Z1 disassembly guide**. In : XPERIABLOG. [En ligne].
Disponible sur : < *www.xperiablog.net/2013/09/15/xperia-z1-disassembly-guide* > (consulté le 2/06/2015).

[20] **Transformation parameters**. In : ITRF web site. [En ligne].
Disponible sur : < ftp://itrf.ensg.ign.fr/pub/itrf/WGS84.TXT > (consulté le 2/06/2015).

Table des annexes

Annexe 1 Transformation coordonnées géographiques vers planes Lambert 93 55

Annexe 2 Transformation du repère ITRF2008 à ETRF2000 56

Annexe 3 Esquisse des principales fonctionnalités de l'application 57

Annexe 4 Résumé 58

Annexe 5 Poster de présentation du TFE 62

Annexe 1
Transformation coordonnées géographiques vers planes Lambert 93

La transformation permet de passer de coordonnées géographiques en coordonnées planes Lambert 93. Les formules ainsi que les constantes sont issues des mémos et autres documents de l'IGN.

Tout d'abord, il faut faire des calculs préalables.

$$£ = \frac{1}{2} \times \ln(\frac{(1 + \sin\varphi)}{(1 - \sin\varphi)} - \frac{e}{2} \times \ln(\frac{(1 + \mathrm{e} \times \sin\varphi)}{(1 - \mathrm{e} \times \sin\varphi)} \qquad (18)$$

avec φ la latitude du point.

$$R = c \times e^{(-n \times £)} \qquad (19)$$

où c est la constante de projection avec pour valeur 11754255.426,
n est l'exposant de projection avec pour valeur 0.7256077650.

$$\gamma = n \times (\lambda - \lambda 0) \qquad (20)$$

λ étant la longitude du point et $\lambda 0$ la longitude du méridien centrale.

Ces calculs intermédiaires sont utilisés dans les deux formules suivantes :

$$\begin{aligned} N &= Ys - R\cos\gamma \\ E &= Xs - R\sin\gamma \end{aligned} \qquad (21)$$

avec Xs égale à 700000.0 et Ys égale à 12655612.05.

Annexe 2
Transformation du repère ITRF2008 à ETRF2000

Le changement entre les deux repères est établi par le mémo « Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign » (source : *etrs89.ensg.ign.fr/memo-V8.pdf*, en ligne le 2/06/2015). Nous allons voir la formule qui permet la transformation avec ces paramètres associés.

$$\begin{pmatrix} X_{ETRF2000} \\ Y_{ETRF2000} \\ Z_{ETRF2000} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{ITRF2008} \\ Y_{ITRF2008} \\ Z_{ITRF2008} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T1 \\ T2 \\ T3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} D & -R3 & R2 \\ R3 & D & -R1 \\ -R2 & R1 & D \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} X_{ITRF2008} \\ Y_{ITRF2008} \\ Z_{ITRF2008} \end{pmatrix} \qquad (22)$$

avec T1 = 52.1 mm avec un taux de 0.1 par an
T2 = 49.3 mm avec un taux de 0.1 par an
T3 = -58.5 mm avec un taux de -1.8 par an
D = 1.34×10^{-9} avec un taux de 0.08 par an
R1 = 0.891 milliseconde d'arc avec un taux de 0.081 par an
R2 = 5.390 milliseconde d'arc avec un taux de 0.490 par an
R3 = -8.712 milliseconde d'arc avec un taux de -0.792 par an

Le site internet du Regional Reference Frame Sub-Commission for Europe (EUREF) Permanent Network propose un service en ligne de conversion utilisant la même transformation.

Annexe 3
Esquisse des principales fonctionnalités de l'application

L'application résultant de la réflexion sur le géoréférencement des réseaux est importante pour une utilisation simple et efficace. L'étude montre des contraintes à respecter pendant le lever qui doivent être facilitées par l'application. Certes, la description suivante ne relève pas d'un cahier des charges, mais a bien pour vocation de traduit les contraintes du processus sur les fonctions de l'application.
Au vu des différentes étapes, une chronologie doit être adoptée dans la réalisation de ce programme.

En premier lieu, une page sur le choix de l'utilisateur permettra de récupérer un profil. Il regroupera les informations relatives à la taille, les paramètres de pas, les historiques et activera les différents capteurs.

Ensuite, il y aura la page de calibration avec soit la réalisation partielle ou totale de ces dernières suivant leur date de validité.

Maintenant les prérequis validés, l'utilisateur doit se positionner sur un point connu. Il doit ainsi rentrer les informations associées, mais aussi respecter les temps. Afin de simplifier les repos, un minuteur informera l'utilisateur et sera assisté par une nivelle qui s'affichera à l'écran pour l'horizontalité. Dans la continuité, l'opérateur est convié à effectuer le tour sur lui-même pour le contrôle de cap.
Ces formalités de mise en route effectuées, un bouton « Départ » est visible. Au début du lever, l'utilisateur l'activera pour déterminer avec précision le temps de départ et actionnera l'icône « Stop » en fin de lever pour arrêter le temps avec précision. Pendant le lever, la nivelle permettra de garder le smartphone le plus horizontal possible.

Enfin, pour terminer le lever, la sélection d'un bouton à cet effet enregistrera les fichiers avec toutes les données nécessaires pour le traitement (précision du GPS en plus de la trame NMEA, données inertielles et barométriques par exemple).

L'application doit être pensée dans un souci de simplicité et dans le but d'être utilisée en extérieur sur un chantier. Les diverses évolutions dans l'avenir viendront ajouter des améliorations à ces pistes de développement.

Annexe 4
Résumé

La présence sur le territoire de 4 millions de kilomètres de réseaux enterrés représente un vrai danger permanent. La connaissance de leur position est devenue une priorité par la mise en place de la déclaration de travaux et la déclaration d'intention de commencement de travaux (DT-Dict). Les solutions aujourd'hui sont assez limitées et regroupées en deux façons. La géolocalisation des réseaux peut se faire soit une fois les travaux finis par une méthode de détection, soit en tranchée ouverte. Les techniques de détection ont fait déjà l'objet de multiples études avec des résultats mitigés. L'objectif de ce travail de fin d'études est de mettre en place une méthode de lever simple, peu coûteuse et conforme à la législation pour l'entreprise COLAS (agence Le Pouzin, Ardèche). Notre étude se focalise sur le géoréférencement à l'aide de smartphone en tranchée ouverte.

L'engouement pour cet appareil et l'avancement des technologies ont suscité le développement de smartphones de plus en plus puissants et polyvalents. L'utilisation de capteur de positionnement GPS et aussi de capteurs inertiels (l'accéléromètre, gyromètre et magnétomètre) constitue une mine d'informations concernant la localisation d'un point. Les réalisations de travaux nous conduisent à l'utilisation de l'hybridation de données calibrées afin d'obtenir les meilleurs résultats. Fort de ce constat, l'étude s'est focalisée dans un premier temps sur les capteurs, puis sur les techniques d'assemblage pour aboutir sur un protocole de lever. Une analyse des résultats vient clôturer l'étude et nous amène vers des perspectives d'améliorations.

Tout d'abord, la découverte des composants de positionnement présents sur le smartphone nous a permis de recenser les points forts, mais aussi les faiblesses à compenser. L'analyse se fait en deux parties, le module de positionnement par satellite (GNSS) d'un côté, et le module inertiel de l'autre. Sur le premier point, tous les smartphones récents sont équipés d'une puce dite A-GPS. Celle-ci est basée sur la technique de la mesure de pseudo-distance, c'est-à-dire du calcul du temps de trajet de l'onde entre le satellite et le récepteur duquel est déduite la distance qui les sépare. Le positionnement d'un point est la résultante d'une intersection de plusieurs distances issues de plusieurs satellites. La partie A du capteur A-GPS est pour assistance. En effet, il est nécessaire de connaître la position des satellites, d'avoir un temps synchronisé et une position approchée pour une détermination plus rapide. Toutes ces informations sont disponibles par le réseau internet et intégrées dans la puce GPS pour l'assister d'où la notion A-GPS. La précision varie entre 2 et 15 m suivant les conditions de lever.

Concernant maintenant la centrale inertielle, les capteurs sont des MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems). Cette technique permet de créer des composants petits et robustes, mais de qualité très variable. En comparaison avec une centrale inertielle haut de gamme, l'accéléromètre, le gyromètre, et le magnétomètre sont d'une précision 100 fois plus faible. La calibration de ces derniers est indispensable pour des utilisations topographiques. Cependant, d'autres grandeurs issues d'hybridation sont disponibles à travers le système d'exploitation, et fournissent des données sur la valeur de la gravité, de l'accélération propre du mobile, mais aussi de son orientation.

Toutefois, aucune information sur les calculs effectués et sur les options de calibration n'est disponible pour les smartphones.

Il en ressort un bilan mitigé avec un positionnement absolu par GNSS et relatif par les capteurs inertiels n'étant pas suffisamment précis pour satisfaire les exigences de la norme DT-Dict, malgré l'abondance des grandeurs.

Le tour d'horizon des capteurs étant effectué, nous allons voir les différentes possibilités d'assemblage des données qu'ils délivrent. Les méthodes reposent toutes sur un outil mathématique, le filtre de Kalman, largement répandu dans le traitement de données dynamiques. Dans son principe, un modèle décrit l'évolution des paramètres au cours du temps mis à jour en fonction des capteurs, ce qui s'adapte parfaitement à la résolution d'une fusion de données en positionnement dynamique. Il existe aujourd'hui trois types de fusion, le couplage lâche, serré et très serré. Les deux derniers utilisent des données brutes, c'est-à-dire le signal disponible sans traitement à la sortie du capteur. Or, nous n'avons à notre disposition qu'un résultat de position avec des coordonnées géographiques transmises par la trame NMEA (National Marine & Electronics Association). L'hybridation est donc basée sur un couplage lâche prenant en entrée des jeux de coordonnées pour en créer un nouveau en sortie. L'une des deux entrées correspond aux positions fournies par le GNSS. L'autre peut être le résultat de plusieurs combinaisons de données non GNSS que nous allons étudier.

Trois stratégies de traitement ont été développées et testées, mais une seule est retenue pour ces performances. Les stratégies qui montraient des faiblesses ont permis d'aboutir à la troisième stratégie de positionnement. Des études ont montré le lien entre un individu, la fréquence de sa marche et la longueur de son pas. L'utilisation de l'accélération permet de déterminer la fréquence de pas comme le montre les points A et B sur l'**illustration 1**. De plus, un calibrage préliminaire fait en amont permet de fixer les paramètres pour chaque utilisateur. Ces données combinées à l'azimut fourni par le smartphone permettent de créer un jeu de coordonnées relatives. Le schéma de l'**illustration 1** reprenant cette démarche.

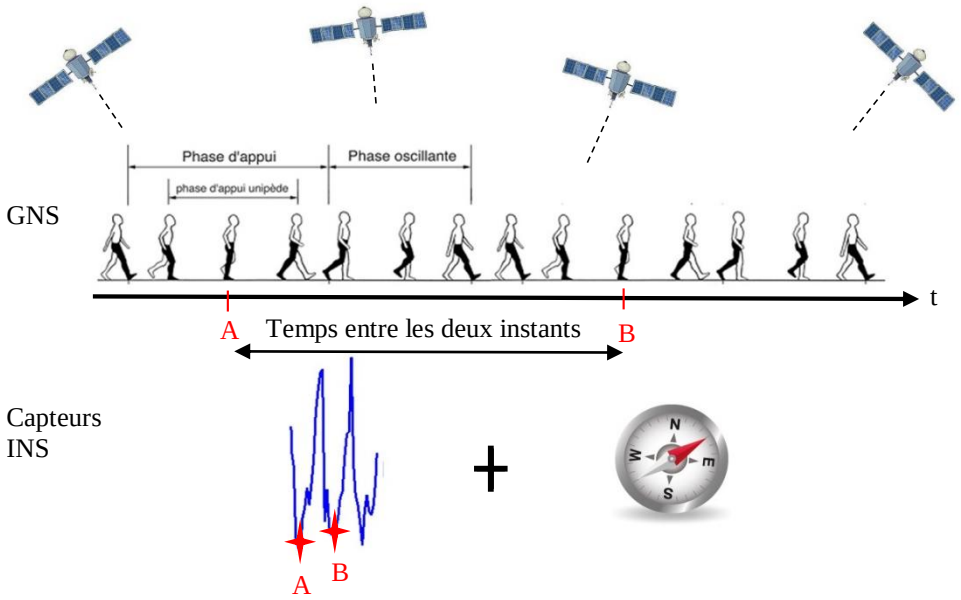


Illustration 1 : Schéma illustrant le principe du GNSS assisté par la biomécanique avec les informations disponibles d'un smartphone au cours du temps.

Une fois déterminées les deux positions, une méthode de calcul et de lever sont mises en place pour l'hybridation. Tout d'abord, afin d'obtenir des données en entrée de qualité optimale, des contraintes de lever interviennent. Le GNSS ne peut acquérir des données qu'à la fréquence d'une position par seconde. De plus, nous avons constaté un délai de 30 secondes pour avoir une convergence de la solution. Ces contraintes imposent non seulement un temps d'initialisation de 30 secondes avant de démarrer, mais aussi le maintien d'une vitesse de marche d'environ un pas par seconde afin d'obtenir des positions régulières. Dans le module inertiel, la détermination du cap est dégradée pendant la marche, il est donc recommandé de changer de direction en restant sur place. L'orientation est capitale pour un bon résultat. Le lever devra se faire à cap constant et avec des changements de direction sur un point. Toutes les informations ont besoin d'être synchronisées. Les phases statiques sont nécessaires pour déterminer les différentes fréquences de pas. Dans un souci de traitement de meilleure qualité, le protocole de lever impose des temps d'arrêt entre chaque point et changement de cap d'une quinzaine de secondes.

Ensuite, le manque de précision dans les coordonnées GNSS absolues et le travail en relatif du deuxième jeu nous impose d'avoir un point connu sur le terrain. Il est important de travailler en boucle fermée pour avoir un moyen de contrôle.

Le processus de lever mis en place dans un souci d'optimisation des valeurs en entrée du filtre permet aussi de répondre à une exigence de la législation. Elle oblige les entreprises à certifier leurs personnels dans le cadre du géoréférencement des réseaux. Le suivi de ce protocole avec la calibration préalable de la marche des utilisateurs est le moyen de certification.

Le protocole se conclut par le traitement des données avec le filtre de Kalman. Dans notre cas, le vecteur d'état est constitué de l'erreur en position sur les axes E, N et Z du système de coordonnées Lambert 93[7] et l'altitude NGF/IGN69[8]. Les valeurs de variance sont définies par une constante pour le GNSS égales à 150 m² alors qu'il est proportionnel à la distance dans l'autre cas et égal à la valeur au carré de 1% de la distance.

Une expérience sur deux segments de 20 m simulant un réseau a été réalisée afin de valider le protocole mis en place. La référence est déterminée à l'aide d'un GPS de topographie utilisant le réseau Teria. Tous les calculs sont effectués dans le même repère, le système de coordonnées RGF93 en projection Lambert 93. Les résultats du positionnement GNSS sont conformes aux attentes avec une précision de positionnement comprise entre 2 et 15 m. Concernant le positionnement issu de la biomécanique, nous sommes à des imprécisions inférieures à 1 m essentiellement dues à un problème d'orientation et croissant avec la distance. L'hybridation programmée nous permet d'obtenir un comportement borné inférieur à 60 cm en planimétrie. Nous constatons l'effet du filtre de Kalman qui a permis de garder le caractère stable du GNSS au cours du temps en préservant la bonne précision de la méthode biomécanique. Le résultat produit une trace du réseau avec tous ces points homogènes comme le montre l'**illustration 2**.

[7] Lambert 93 est le système de projection français de référence basé sur le système RGF93
[8] NGF/IGN69 est la dénomination donnée au système altimétrique légal français.

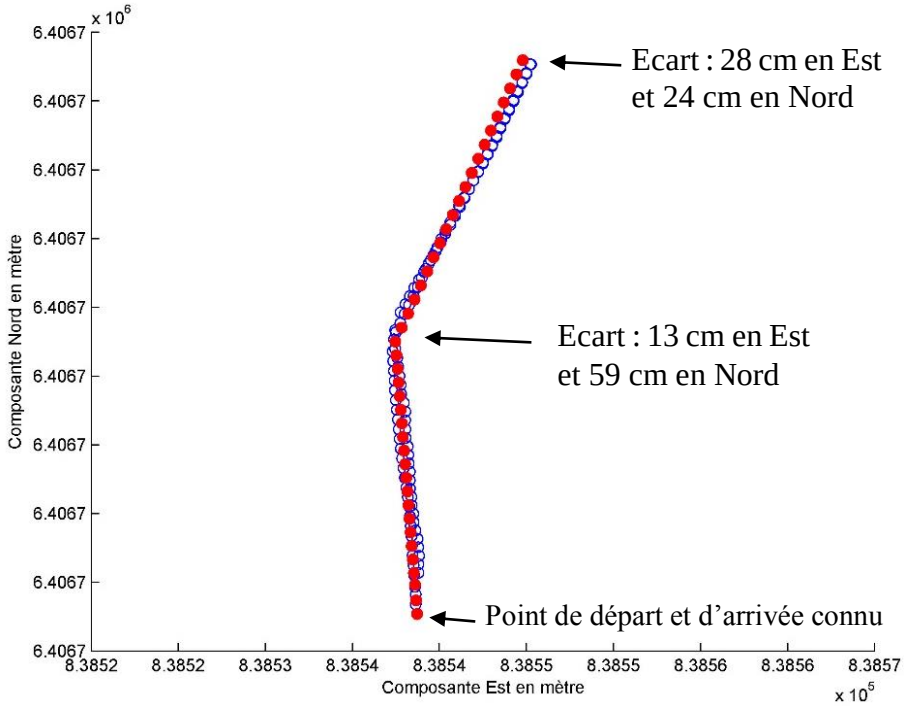


Illustration 2 : Résultat de l'hybridation en coordonnée Lambert 93. Les points rouges représentent la référence et les cercles bleus la position provenant du couplage.

Le problème vient de la composante verticale déterminée seulement par le GPS. La solution vient des constructeurs qui implantent dans les nouveaux smartphones un nouveau capteur, le baromètre. Ce capteur permet par différence de pression d'obtenir une dénivelée entre les points. Les premiers tests révèlent une incertitude inférieure à 50 cm sans couplage et calibration. Cette amélioration laisse présager un bel avenir au smartphone dans le géoréférencement de réseaux.

Ce projet se rapproche de l'objectif fixé à 40 cm de précision. De plus, des perspectives d'avenir très encourageantes sont à noter. L'amélioration des technologies que constitue le smartphone à travers le baromètre par exemple est un atout considérable. De plus l'utilisation des informations de précision sur le GPS permettrait d'affiner le filtre de Kalman. Ensuite, le travail sur les données issues de l'hybridation du système tel que l'orientation serait une opportunité d'apporter une calibration plus cohérente. La relation pour déterminer la longueur d'un pas pourrait être optimisée en tenant compte de la topologie du terrain. Enfin, les autres capteurs comme l'appareil photo ne sont pas pris en compte dans les traitements. Leurs informations seraient un plus dans le processus de calculs qui permettrait la conformité aux normes DT-Dict.

Ce travail de fin d'études fut une occasion exceptionnelle de recherche sur un domaine mélangeant la technologie à la topographie. Dans un monde où le SIG devient une priorité et la communication indispensable, le smartphone est un outil qui pourrait bien devenir un appareil de mesure.

Annexe 5
Poster de présentation du TFE

COLAS Rhône-Alpes Auvergne

le cnam esgt – École supérieure des géomètres et topographes

Mise en place d'une méthode de positionnement dynamique, accessible via smartphone, répondant aux normes de la DT-Dict

Terrain

Situation

En France, il y a **4 millions de kilomètres de réseaux**. Chacun des travaux réalisés comporte le risque de détruire des réseaux existants. En 2012, l'Etat à travers la Déclaration de travaux et la Déclaration d'intention de commencement de travaux (DT-Dict) oblige les entreprises à **géoréférencer leurs réseaux à 40 cm**.

Source : Colas

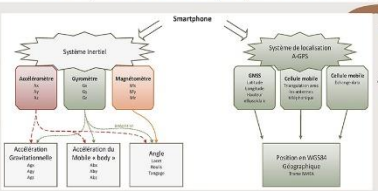
?

Source : www.solfeau.com/Images/FdP_07.png

Des techniques existent mais sont coûteuses et pas adaptées aux besoins. En parrallèle **le smartphone** est lui en pleine expansion et très populaire. Alors pourquoi pas l'utiliser comme **instrument de mesure?**

Smartphone

A-GPS, Accéléromètre, Gyromètre et Magnétomètre



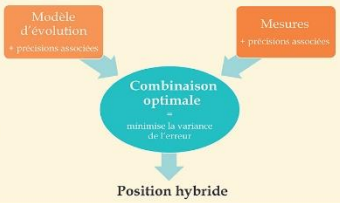
4 capteurs = 7 sources d'informations

Pas assez précis (position **2 -15 m** en absolue)

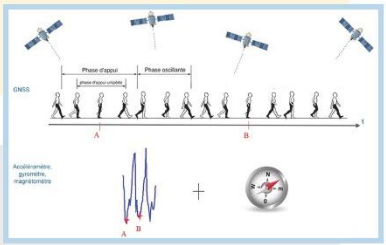
Améliorer par combinaison des données

Hybridation

Filtre de Kalman



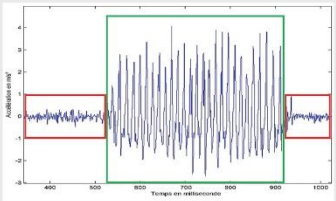
- Position **GNSS**
- Position issue par **la biomécanique** : détection de pas par l'accéléromètre avec une orientation issue d'une combinaison de capteurs.



Géoréférencement

Résultat et analyses

Le signal de l'accéléromètre permet par une analyse du signal de déterminer une fréquence de pas. Le graphique ci-dessous montre le type de courbe issue du capteur. Les zones rouges représentent les moments statiques et la zone verte la marche.

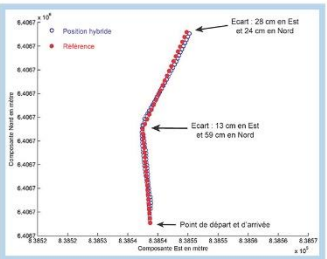


Le résultat de la fusion entre le GNSS et la longueur de pas orientée par le filtre de Kalman est **inférieur à 60 cm** sur un parcours de 2 segments de 20 m. Le graphique ci-dessous représente la trace dans le système de coordonnées Lambert 93. En altimétrie, seul le GPS fournit une information métrique. Une **nouveauté** est apportée dans les smartphones, **le baromètre**. Ce capteur par différence de pression nous donne la dénivelée. Les premiers résultats sans couplage sont à 50 cm.

Conclusion

Le géoréférencement de tous les réseaux enterrés **par smartphone** est une solution **simple et peu coûteuse**. L'étude montre des résultats très encourageants avec **un positionnement à 60 cm** sur les 3 axes aujourd'hui. L'hybridation mise en place avec la biomécanique et le GNSS est un nouveau pas vers ce SIG des réseaux.

Il reste encore à faire dans le domaine pour satisfaire les normes de la DT-Dict. Cependant, l'avancement des technologies et la popularité de cet appareil sont des vecteurs porteurs pour l'avenir. De plus, des améliorations dans les calibrations mais aussi l'apport de nouvelles données dans le traitement sont des perspectives d'optimisation. Le **smartphone** est un appareil polyvalent et on peut maintenant envisager son utilisation pour des **mesures topographiques**.



Remerciements :

Philippe Klinklin (directeur d'agence), Philippe Dantaux (chef du bureau d'études), Alexandre Gallo-Balma (chargé d'études) et les autres colaborateurs de l'agence COLAS

José Cali (Chercheur ESGT), Jérôme Verdun (Chercheur ESGT) et Clément Roussel (Thésard ESGT)

Travail de fin d'études soutenu le 8 juillet 2015

Cyril PERRET, 3ème année d'ingénieur ESGT

Liste des figures

Figure 1 : Image schématisant un smartphone avec les axes de la centrale inertielle (source : developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/Guide/Events/Orientation_and_motion_data_explained)....9

Figure 2 : Graphique type de la variance d'Allan en fonction du temps pour différents bruits (source : [10]) 13

Figure 3 : Graphique illustrant la variation de la composante Nord en fonction du temps en seconde (source : données issues du smartphone Sony Z1 compact). 17

Figure 4 : Graphique des écarts en position planimétrique pour des points issus de la puce A-GPS en une heure avec un fix unique. 18

Figure 5 : Graphique illustrant la variation de la composante Nord en fonction du temps en seconde (source : données issues du smartphone Sony Z1 compact). 18

Figure 6 : Graphique superposant les composantes Nord précédentes. 19

Figure 7 : Graphique de la trace des points mesurés avec le smartphone en bleue et de la référence en rouge en coordonnées Lambert 93. 20

Figure 8 : Schéma de principe des étapes de calculs pour la navigation inertielle avec les deux capteurs, l'accéléromètre et le gyromètre. 23

Figure 9 : Graphiques de la variance d'Allan pour les trois axes de l'accéléromètre (source : à partir du travail de Clément ROUSSEL et de la librairie Python « Allantools » d'Anders Wallin). 24

Figure 10 : Graphiques de la variance d'Allan pour l'axe du cap de l'orientation (source : à partir du travail de Clément ROUSSEL et de la librairie Python « Allantools » d'Anders Wallin). 24

Figure 11 : Schéma synthétisant le principe de la fusion par un filtre de Kalman. 28

Figure 12 : Graphique mettant en relations les différentes informations issues du smartphone dans une hybridation par filtre de Kalman. 30

Figure 13 : Schéma illustrant le principe du GNSS assisté par la biomécanique avec les informations disponibles d'un smartphone au cours du temps. 31

Figure 14 : Photographie du site de l'expérimentation devant l'agence Colas de Le Pouzin. 37

Figure 15 : Extrait d'une vue aérienne de l'agence Colas de Le Pouzin avec les points du tracé simulant un réseau (source : Google Earth) 38

Figure 16 : Extrait d'une partie de la mesure de l'accélération sur l'axe z en fonction du temps. La zone rouge est le mode arrêté et la verte le moment de marche. 42

Figure 17 : Extrait de la latitude sur l'ensemble du parcours en fonction du temps. 42

Figure 18 : Graphique des mesures de l'azimut au cours du temps pendant la durée de l'expérience. 43

Figure 19 : Graphique des points issus du lever par le GNSS du smartphone. 45

Figure 20 : Graphique des points issus du lever par les pas avec le cap du smartphone. 45

Figure 21 : Résultat de l'hybridation en coordonnée Lambert 93. 45

Figure 22 : Graphique représentant les écarts entre la position hybride et la référence sur la composante Est en mètre. 46

Figure 23 : Graphique représentant les écarts entre la position hybride et la référence sur la composante Nord en mètre. 47

Liste des tableaux

Tableau 1 : Tableau des caractéristiques de l'accéléromètre du smartphone (source [17]).....21

Tableau 2 : Tableau résumant les caractéristiques du gyromètre du smartphone (source [16]). 21

Tableau 3 : Tableau résumant les caractéristiques du magnétomètre du smartphone (source [18])...22

Tableau 4 : Résultat sur la position de deux imprécisions de mesure. 25

Tableau 5 : Tableau récapitulatif des avantages et inconvénients des systèmes INS et GNSS. 26

Tableau 6 : Tableau récapitulant les valeurs de calibration du smartphone. 39

Tableau 7 : Tableau sur la calibration des paramètres de marche d'un utilisateur. 40

Tableau 8 : Tableau représentant les caractéristiques de marche pendant le lever de réseau. 44

Tableau 9 : Tableau reprenant les résultats du baromètre de l'iPhone 6. 48

Mise en place d'une méthode de positionnement dynamique des réseaux, accessible via smartphone, répondant aux normes de la DT-Dict

TFE d'Ingénieur C.N.A.M. ESGT, LE MANS 2015

RESUME

Ce travail est une étude de faisabilité concernant l'utilisation du smartphone dans le cadre de géoréférencement des réseaux enterrés par des opérateurs du BTP. Les nouvelles technologies ont permis l'introduction de capteurs de position (GNSS, capteurs inertiels, magnétomètre, baromètre) dans les smartphones pouvant être utilisés avec des applications du positionnement dynamique.

L'hybridation des données issues des différents capteurs de positionnement réalisé de façon classique par un filtre de Kalman permet de réduire l'incertitude en position obtenue avec les capteurs pris individuellement. La question est de savoir si l'incertitude qui serait obtenue avec les capteurs intégrés sur un smartphone serait compatible avec les exigences de la DT-Dict (40 cm en classe de précision). Le smartphone apparaîtrait alors comme un outil simple, parfaitement adapté à des levers de réseaux en tranchée ouverte sur les chantiers de BTP.

Ce travail de fin d'études comporte le développement et la validation d'une méthode d'hybridation des données de position issues d'un smartphone récent et qui s'appuie sur un modèle biomécanique de la marche. Les tests réalisés ont révélé une incertitude sur le positionnement planimétrique de 60 cm et sur le positionnement vertical de 50 cm sans hybridation. Parmi les pistes d'améliorations de ce positionnement figure l'intégration du positionnement barométrique dans le processus d'hybridation et l'amélioration des performances des capteurs d'orientations intégrés au smartphone.

Mots clés : GPS, smartphone, inertiel, géoréférencement, réseaux, DT-Dict, positionnement dynamique, filtre de Kalman, biomécanique.

SUMMARY

This work is a feasibility study on the use of the smartphone in the context of georeferencing underground networks, implemented by construction operators. New technologies have allowed the introduction of position sensors (GNSS, inertial sensors, magnetometer, barometer) in smartphones, which can be used with dynamic positioning applications.

The hybridization data from the various position sensors conventionally produced by a Kalman filter is used to reduce uncertainty in the position obtained with the individual sensors. Whether the uncertainty obtained with integrated sensors on a smartphone is compatible with the requirements of the DT-Dict (40 cm accuracy class) is a crucial question. The smartphone appears as a simple tool, perfectly suitable for topographic surveys, carried out on sliced open networks on construction sites.

This work graduation includes the development and validation of a hybridization method that applies on position data from a recent smartphone based on a biomechanical model. The tests revealed a positioning uncertainty of 60 cm for the planimetric coordinates and of 50 cm without hybridization for the vertical. Among the ways of improvement there are the integration of barometric positioning in the hybridization process and the increase of the accuracy of the guidance sensors integrated into the smartphone.

Key words : GPS, smartphone, inertial sensor, georeferencing, networks, DT-Dict, dynamic positioning, Kalman filter, biomecanics.