



**HAL**  
open science

## Estimation des déplacements des piétons à partir des mesures inertielles et GPS d'un smartphone

Vincent Demeule

► **To cite this version:**

Vincent Demeule. Estimation des déplacements des piétons à partir des mesures inertielles et GPS d'un smartphone. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2013. dumas-00920114

**HAL Id: dumas-00920114**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00920114v1>**

Submitted on 17 Dec 2013

**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**

**Vincent DEMEULE**

---

**Estimation des déplacements des piétons à partir des mesures inertielles et GPS  
d'un smartphone**

**Soutenu le 10 juillet 2013**

---

**JURY**

**PRÉSIDENT :** M. José CALI

**MEMBRES :** Mme Valérie RENAUDIN, maître de stage  
M. Jérôme VERDUN, professeur référent  
M. Stéphane DURAND  
M. Olivier de VIRON

# Avant-propos

Le Travail de Fin d'Études constitue la fin de la formation d'ingénieur géomètre dispensée à l'ESGT. Ce mémoire relate mon travail de cinq mois effectué à l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR) de Nantes.

Cet avant-propos me permet de remercier l'ensemble des personnes ayant contribué à ce travail.

Je tiens tout d'abord à remercier Valérie RENAUDIN, mon maître de stage, pour sa disponibilité et son aide précieuse tout au long de ces cinq mois.

Je remercie également les autres membres du laboratoire Géoloc de l'IFSTTAR pour leur accueil : François PEYRET, responsable du laboratoire, Miguel ORTIZ et David BETAILLE.

Je tiens à remercier Jérôme VERDUN, mon professeur référent, pour son encadrement et les corrections apportées à ce mémoire.

Merci enfin à mes proches pour leur soutien pendant l'ensemble de ma scolarité.

# Glossaire

**Centrale inertielle :** Instrument utilisé en navigation mesurant les mouvements d'un mobile pour estimer son orientation, sa vitesse linéaire et sa position.

**Accéléromètre :** Capteur fixé à un mobile permettant de mesurer son accélération linéaire.

**Gyromètre :** Capteur fixé à un mobile permettant de mesurer une vitesse angulaire.

**Gyroscope :** Capteur de position angulaire.

**Magnétomètre :** Instrument mesurant le champ magnétique

**Filtre de Kalman :** Outil mathématique permettant d'estimer l'état d'un système, en fonction de son état précédent, des commandes appliquées et de mesures.

## Liste des abréviations

**IMU** : Inertial Measurement Unit (Centrale à inertie)

**MEMS** : Micro Electro-Mechanical Systems (Microsystème électromécanique)

**PDR** : Pedestrian Dead Reckoning (Navigation à l'estime pour piétons)

**GNSS** : Global Navigation Satellite System (Système de positionnement par satellites)

**GPS** : Global Positioning System

**PPP** : Precise Point Positioning

# Table des matières

<b>GLOSSAIRE</b>	<b>3</b>
<b>LISTE DES ABREVIATIONS</b>	<b>4</b>
<b>1. INTRODUCTION</b>	<b>6</b>
1.1. STRUCTURE D'ACCUEIL	6
1.2. ÉTAT DE L'ART	6
1.3. NAVIGATION A L'ESTIME POUR PIETON	7
<b>2. ALGORITHMES DE CALIBRATION</b>	<b>9</b>
2.1. MESURES INTEGREES	9
2.1.1. <i>Mesures inertielles</i>	9
2.1.2. <i>Mesures GNSS</i>	11
2.2. RAPPELS THEORIQUES	12
2.2.1. <i>Phase de prédiction</i>	12
2.2.2. <i>Phase de correction</i>	12
2.2.3. <i>Non linéaire</i>	13
2.3. COUPLAGE LACHE	14
2.3.1. <i>Modèle de mouvement</i>	14
2.3.2. <i>Modèle de mesure</i>	14
2.3.3. <i>Tri des mesures</i>	16
2.4. COUPLAGE SERRE	18
2.4.1. <i>Modèle de mouvement</i>	18
2.4.2. <i>Modèle de mesure</i>	19
2.4.3. <i>Tri des mesures</i>	21
<b>3. ÉVALUATION DES PERFORMANCES</b>	<b>23</b>
3.1. DESCRIPTION DE L'EQUIPEMENT D'ESSAI	23
3.1.1. <i>Mesures inertielles</i>	23
3.1.2. <i>Mesures GPS</i>	24
3.2. PROTOCOLE EXPERIMENTAL	26
<b>4. RESULTATS ET ANALYSE</b>	<b>28</b>
4.1.1. <i>Problèmes rencontrés</i>	28
4.1.2. <i>Résultats du couplage lâche</i>	30
4.1.3. <i>Résultats du couplage serré</i>	34
4.1.4. <i>Autre résultat (test avec la centrale inertielle de l'iPhone 4)</i>	39
<b>5. COMPARAISON DES DEUX STRATEGIES DE COUPLAGE</b>	<b>40</b>
<b>6. CONCLUSION</b>	<b>41</b>
<b>TABLE DES FIGURES</b>	<b>43</b>
<b>TABLE DES TABLEAUX</b>	<b>44</b>
<b>REFERENCES</b>	<b>45</b>
<b>RESUME</b>	<b>46</b>

# 1. Introduction

## 1.1. Structure d'accueil

Ce travail de fin d'étude s'est déroulé entre le 4 février et le 21 juin 2013 à l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR). L'IFSTTAR est issu de la fusion de l'INRETS et du LCPC ; il est composé de sept centres en France. Le laboratoire d'accueil du stage est « Geoloc », dirigé par François Peyret, qui fait partie du département Cosys (Composants et systèmes) de l'IFSTTAR.

La problématique de l'estimation des déplacements publics des piétons est récente au sein de l'IFSTTAR. Sa recherche est déclinée sous plusieurs approches mêlant sciences exactes, humaines et sociales. Les recherches conduites en sciences sociales et humaines, étudient à la fois l'aspect comportemental traité par le biais de simulations, et l'aspect psychosocial. Un autre domaine de recherche est celui de la géolocalisation des piétons dont s'occupe principalement ma maitre de stage Valérie Renaudin. Cet axe de recherche fait partie d'une des grandes orientations inscrites dans la planification de la recherche à 10 ans de l'IFSTTAR, à savoir : inventer la mobilité durable.

## 1.2. État de l'art

La géolocalisation des piétons diffère sensiblement de celle des véhicules routiers. En effet, les piétons empruntent des chemins difficilement prévisibles contrairement aux véhicules qui se limitent essentiellement aux voies carrossables. Cette spécificité de la géolocalisation des piétons rend plus difficile l'application des techniques de « map matching <sup>1</sup> » pour contraindre le déplacement du piéton sur une voie. De plus, les piétons se déplacent généralement dans des environnements mal voire non couverts par des systèmes de positionnement par satellites.

A ce jour, plusieurs méthodes ont été envisagées par les chercheurs et les industriels pour la géolocalisation des piétons. L'une des techniques la plus développée repose sur une trilatération à partir d'ondes émises par des antennes placées à des points connus. La technologie la plus utilisée est actuellement le « Wi-Fi » (Wireless-Fidelity) de par sa compatibilité avec de nombreux appareils (« smartphones », tablettes, ordinateurs portables...) malgré les problèmes posés par les niveaux de service en fonction de la densité du réseau de points d'accès. La méthode du « fingerprinting Wi-Fi » corrèle la puissance du signal électromagnétique reçu et une carte préétablie [1] pour estimer le positionnement de l'utilisateur. D'autres technologies ont été expérimentées telle l'Ultra Large Bande (ULB) ou l'utilisation de puces RfId (Radio Frequency Identification) [2].

Ces méthodes sont relativement fiables mais présentent certaines limites :

- nécessité de mettre en place une infrastructure dédiée coûteuse ;
- problématique du respect de la vie privée : les serveurs nécessaires pour le positionnement du piéton peuvent conserver des traces des déplacements ;
- manque de continuité : une fois sorti de la zone couverte, le positionnement n'est plus disponible.

---

<sup>1</sup> Processus visant à faire correspondre les observations GPS avec des données cartographiques (réseau de routes par exemple).

### 1.3. Navigation à l'estime pour piéton

Compte-tenu des limites des techniques présentées, le laboratoire Géoloc se concentre sur la navigation à l'estime (Dead Reckoning). Elle permet de connaître son positionnement même lorsqu'aucun point de repère n'est disponible. C'est une technique ancienne utilisée alors par les navigateurs quand une météo peu clémente ne leur permettait plus d'utiliser les astres pour se repérer. L'utilisation de la boussole et du loch<sup>2</sup> permettait alors de connaître le cap et la distance parcourue. La position est alors déduite à partir d'une position connue antérieure et des informations de cap et de distance.

La navigation à l'estime pour piéton utilise des mesures de type inertiel fournies par des capteurs de type MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems).

Cette méthode comporte plusieurs avantages :

- autonome : elle ne nécessite pas d'infrastructure spécifique et ne pose donc pas le problème du respect de la vie privée ;
- utilisable aussi bien en intérieur qu'en extérieur ;
- utilisation de dispositifs déjà massivement répandus (smartphones).

Les techniques actuelles supposent les capteurs inertiels rigidement attachés au piéton (au pied ou à la ceinture par exemple). On s'intéresse ici à l'utilisation d'un dispositif pouvant être tenu en main ce qui généralise la technique à toutes les situations. La navigation à l'estime piétonne s'appuie sur des capteurs comparables à ceux que l'on peut trouver dans les « smartphones » actuels (MEMS). L'utilisateur n'a donc pas à acheter un dispositif dédié.

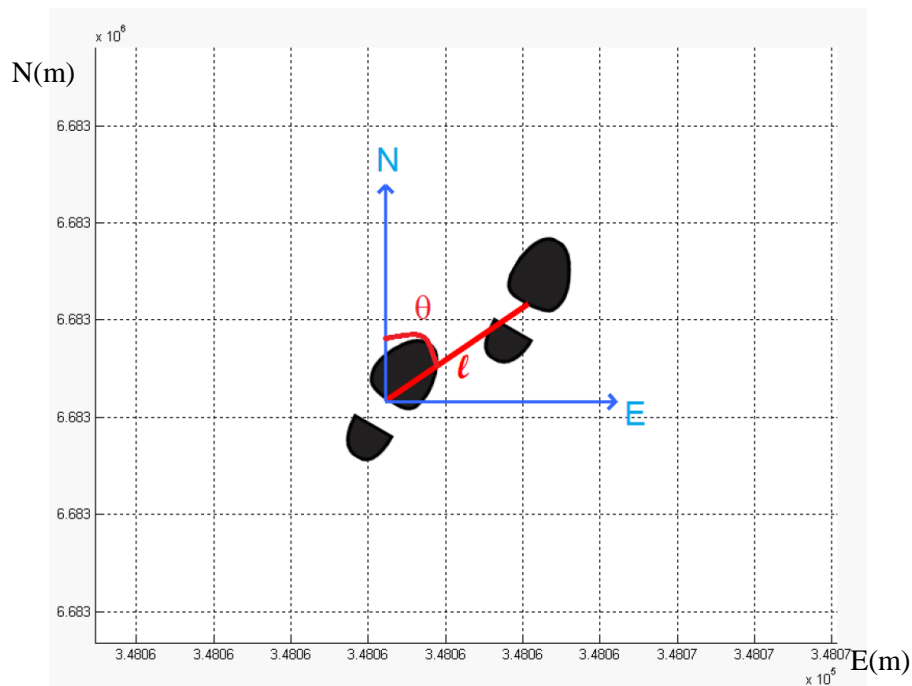
Leur précision étant mauvaise car entachée d'erreurs, il s'agit non pas d'intégrer les mesures des capteurs directement mais d'effectuer un traitement sur les mesures et de mettre en place des seuils pour détecter des motifs (répétitions cycliques dans les mesures enregistrés par les accéléromètres, gyromètres). La complexité du traitement est plus grande lorsque le capteur est placé dans la main du piéton car il faut alors distinguer les fréquences correspondant à la marche de celles correspondant aux mouvements du bras qui n'a pas de rapport direct avec le déplacement du piéton.

La navigation à l'estime utilise deux informations pour déduire la position à l'instant N à partir de la position à l'instant N-1 (un instant correspondant à un pas) : la longueur du pas ( $l$ ) et le cap de marche ( $\theta$ ).

---

<sup>2</sup> Instrument de navigation maritime estimant la vitesse de déplacement.





**Figure 1.1 : Illustration du fonctionnement de la navigation à l'estime piétonne (sans échelle)**

Actuellement, le cap de marche ne peut être déterminé de façon précise et nécessite encore des recherches fondamentales. En effet, le cap est actuellement calculé en effectuant une double intégration des mesures gyrométriques. Ces mesures dérivant rapidement ( $0.007^\circ/s$  pour les gyromètres utilisés), le cap de marche est entaché d'erreurs. Une amélioration de la précision est rendue possible par l'utilisation d'un magnétomètre. Lorsque le champ magnétique local est quasiment statique, le taux de variation de ce dernier mesuré par un magnétomètre est combiné avec la vitesse angulaire mesurée par l'instrument afin de produire une estimation de l'erreur gyroscopique. Cette erreur peut alors être utilisée pour corriger les erreurs variables dans le temps inhérentes à toute mesure gyroscopique [3]. Le défaut d'alignement dynamique entre l'orientation de l'outil dans la main et la direction de marche est un élément important à prendre en compte pour la détermination du cap de marche

La composante « longueur de pas » est l'objet de ce mémoire. Actuellement, cette longueur de pas suit un modèle [4], alimenté par trois paramètres déterminés ( $a, b$  et  $c$ ), qui dépend de la taille de l'individu et de sa fréquence de marche. Des paramètres dits « universels » ont été déterminés de façon empirique [5].

Ces paramètres expérimentaux ne s'adaptent pas à tous et d'autres éléments comme l'état de fatigue doivent être pris en compte. La calibration des paramètres de ce modèle par l'utilisation de systèmes de positionnement par satellites est la méthodologie qui va être développée dans ce mémoire. Le processus de calibration sera répété à plusieurs reprises pour s'adapter aux changements de démarche d'un individu causé par la fatigue, une blessure, ou autres. Une fois la calibration effectuée, les mesures GNSS ne sont plus utilisées, seules les mesures inertielles permettent le positionnement.

La finalité étant de fournir une solution de navigation, les algorithmes établis devront être capables de fonctionner en temps réel.

## 2. Algorithmes de calibration

On a vu que la navigation à l'estime permet d'observer des événements tels que la réalisation d'un pas. La répétition de cet événement sur un temps donné nous permet d'obtenir la fréquence de marche. Ces seuls éléments ne permettent pas de déduire une longueur de pas. Un modèle a été développé qui lie la fréquence, la taille de l'individu et la longueur d'un pas.

Une calibration de ce modèle faite pour chaque usager et exécutée de façon répétée devrait améliorer le modèle basé actuellement sur des paramètres universels. L'intégration de données GNSS est la solution envisagée dans ce mémoire. Elles permettraient d'obtenir des positions aux instants des pas ou des vitesses de marche. Ces informations couplées aux données issues de la centrale inertielle individualiseraient les paramètres et les mettraient à jour au cours du temps.

Le filtre de Kalman est une approche très utilisée dans les systèmes dynamiques et se prête donc à ce couplage.

Après quelques rappels théoriques, deux stratégies seront développées ; le couplage lâche dans un premier temps puis un couplage serré.

### 2.1. Mesures intégrées

Le couplage des mesures GNSS et inertielles est assez courant. La spécificité de notre traitement est que l'on dispose de mesures issues de capteurs bas-coût qui obligent à adopter des traitements spécifiques.

#### 2.1.1. Mesures inertielles

Les capteurs inertiels utilisés durant ce travail sont des capteurs de type bas coût. Les accéléromètres 3 axes mesurent l'accélération linéaire du « smartphone » selon trois axes orthogonaux. Les gyromètres mesurent eux une vitesse angulaire autour des trois axes. On différencie le gyromètre du gyroscope qui est lui un capteur de position angulaire.

Les travaux réalisés précédemment montrent que la stratégie de traitement des données inertielles par une double intégration n'est pas adéquate [6]. La double intégration augmente les erreurs qui, si elles ne sont pas corrigées par des mesures externes, sont proportionnelles au temps [7].

La marche étant un mouvement répétitif, les travaux ont porté sur la définition de mouvements spécifiques et de la reconnaissance de motifs sur les signaux enregistrés par les MEMS.

Le programme d'analyse de cycle de marche développé par Valérie Renaudin a été utilisé pour le traitement de l'ensemble des mesures inertielles. Il a constitué un outil indispensable pour extraire des mesures inertielles enregistrées des informations concernant la marche. Celui-ci fonctionne avec des capteurs inertiels pouvant être tenus en main comme c'est le cas pour un « smartphone ».

Ce programme effectue un prétraitement des données inertielles avec un filtrage des fréquences supérieures à 10 Hz (non significatives pour les mouvements humains). Le programme calcule ensuite la norme des signaux (des accéléromètres 3-axes et gyromètres 3-axes) puis soustrait la moyenne des valeurs du signal sur un intervalle de temps prédéfini (traitement effectué sur fenêtre glissante). Cela a

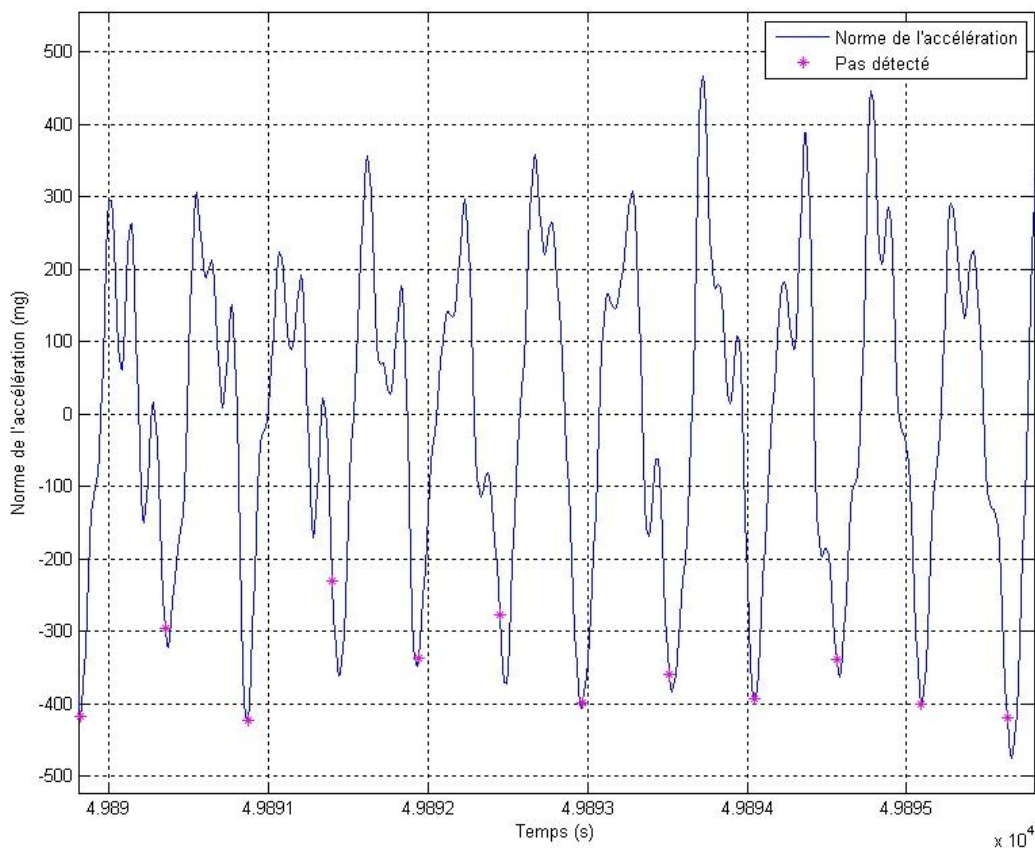
pour effet de ne pas être affecté par les bruits de mesures, ce qui est intéressant au vu de la qualité des capteurs utilisés [5].

Une analyse fréquentielle permet ensuite d’extraire les fréquences dominantes, le programme va ainsi détecter parmi toutes les fréquences celle qui correspondent à la fréquence de marche.

Une phase de détection de mouvements va permettre d’effectuer un classement (phase statique, phase irrégulière, phase « texting » et phase « swing »). Ces phases seront explicitées par la suite.

La dernière phase va consister à détecter les instants de pas. En sortie de traitement, on dispose donc des instants de pas et de la fréquence de marche associée au pas.

La Figure 2.1 illustre les répétitions des mesures pour un mouvement de marche, ce sont ces motifs qui permettent de détecter les pas.



**Figure 2.1 : Exemple de répétition du signal lors de la marche**

Le modèle de pas évoqué précédemment permet d’associer une longueur au pas détectés par l’algorithme de détection de pas. En effet, des études en biomécanique [4] montrent qu’il existe une relation affine entre la longueur de pas et la fréquence de marche.

Cette relation est donnée par la formule :

$$s = h(a * f_{marche} + b) + c \quad (2.1)$$

avec :

- $s$  : longueur du pas (m) ;
- $h$  : taille de l’individu (m) ;
- $f_{marche}$  : fréquence de marche (Hz) ;
- $K=\{a,b,c\}$  : jeu de paramètres (sans unité).

## 2.1.2. Mesures GNSS

Différents types de mesures seront utilisées pour les deux couplages présentés par la suite. Des positions sont obtenues à partir des mesures de pseudo-distance ou de phase pour le couplage lâche et des mesures de type Doppler sont utilisées lors du couplage serré.

L'effet Doppler correspond au décalage de fréquence d'un signal entre son émission et sa réception lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie. Cela s'applique aux signaux émis par les satellites appartenant aux différentes constellations GNSS.

La vitesse de déplacement des satellites étant connue, il est possible de connaître la vitesse de déplacement du récepteur grâce aux mesures de Doppler.

Ce type de mesures est intéressant car il apporte des informations sur la direction de déplacement du récepteur. Il est également moins sujet aux multi-trajets et aux bruits [8]. Cela s'explique par le fait que la vitesse de déplacement du récepteur est ici faible : à peu près  $1.4\text{m.s}^{-1}$  pour un piéton. La variation des multi-trajets est donc faible et impacte peu les mesures Doppler.

## 2.2. Rappels théoriques

Le filtre de Kalman, employé pour la navigation, utilise la dynamique du système et les observations que l'on intègre. Il s'agit d'un algorithme reposant sur un ensemble de prédictions et d'observations. L'objectif de ce filtre est d'estimer le vecteur d'état avec une variance minimale. C'est un filtre de type discret, ce qui facilite son implémentation.

Le filtre de Kalman est fondé sur une série d'hypothèses ; le bruit du modèle et le bruit de mesure sont de type bruit blanc gaussien centrés et non corrélés. Les bruits de mesures sont des signaux parasites venant se superposer au signal utile (l'information qui nous intéresse).

Le modèle d'état linéaire sous sa forme discrète est le suivant :

$$\begin{cases} x_k = \Phi_{k,k-1} \cdot x_{k-1} + w_{k-1} \\ z_k = H_k \cdot x_k + n_k \end{cases} \quad (2.2)$$

où :

$x_k$  est le vecteur d'état à l'instant  $t_k$  ( $n \times 1$ ) ;

$\Phi_{k,k-1}$  est la matrice de transition entre les époques ( $n \times n$ ) ;

$w_{k-1}$  et  $n_k$  sont respectivement les bruits du système ( $n \times 1$ ) et de mesure ( $p \times 1$ ) ;

Ce sont des bruits blancs et gaussiens de matrices de covariance respectives ;

$z_k$  est le modèle d'observation ( $p \times 1$ ) ;

$H_k$  : est la matrice de mesure à l'instant  $t_k$  ( $p \times n$ ).

### 2.2.1. Phase de prédiction

La phase de prédiction utilise la dynamique du système et le vecteur d'état actuel. Elle prédit le nouvel état a priori du système. Cette phase est décrite par les équations suivantes :

$$\hat{x}_k^- = \Phi_{k,k-1} \hat{x}_{k-1}^+ \quad (2.3)$$

$$P_k^- = \Phi_{k,k-1} P_{k-1}^+ \Phi_{k,k-1}^T + Q_k \quad (2.4)$$

Une valeur avec le signe « ^ » correspond à une valeur estimée. Une valeur prédite est représentée par un indice « - » et le « + », une valeur mise à jour. La matrice de covariance du vecteur d'état  $P_{k-1}$  est mise à jour par propagation de variance et par l'ajout des incertitudes du modèle.

### 2.2.2. Phase de correction

Durant la phase de correction, si des observations sont disponibles, le vecteur d'état et la matrice de covariance prédits sont mis à jour comme suit :

$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k v_k \quad (2.5)$$

$$P_k^+ = (I - K_k H_k) P_k^- \quad (2.6)$$

où :

$v_k$  est la séquence d'innovation, différence entre les mesures intégrées au filtre et les mesures prédites

$$(v_k = z_k - \hat{z}_k = z_k - H_k \hat{x}_k^-);$$

$K_k$  est le gain de Kalman.

Le gain de Kalman pondère la correction de l'état estimé. Il est déterminé pour produire la variance minimale. Ce dernier est donné par l'équation :

$$K_k = P_k^- H_k (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1} \quad (2.7)$$

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

### 2.2.3. Non linéaire

Dans les applications qui seront présentées, le filtre de Kalman classique ne peut être utilisé car des équations sont non linéaires. Il convient dans ces cas-là d'utiliser le filtre de Kalman non linéaire.

L'équation (2.2) devient :

$$\begin{cases} x_k = f(x_{k-1}) + w_{k-1} \\ z_k = h(x_k) + n_k \end{cases} \quad (2.8)$$

où  $f$  et  $h$  sont des fonctions non linéaires du vecteur d'état relatives respectivement au modèle d'évolution dynamique et au modèle d'observation.

La linéarisation des fonctions  $f$  et  $h$  se fait au voisinage d'une trajectoire de référence représentée par le vecteur d'état  $x_k^*$  tel que :

$$x_k^* = x_k + \delta x_k \quad (2.9)$$

La valeur de référence est représentée par le signe « \* », le «  $\delta$  » correspond à la perturbation de la valeur.

Afin de pouvoir linéariser avec un développement de Taylor au premier ordre, les perturbations doivent être suffisamment petites. A partir de l'équation (2.8), on obtient l'équation aux perturbations :

$$\begin{cases} \delta x_k = \Phi_{k,k-1} \delta x_{k-1} + w_k \\ \delta z_k = z_k - h(x_k) = H_k \delta x_k + n_k \end{cases} \quad (2.10)$$

L'équation (2.10) utilise donc la perturbation du vecteur d'état et les écarts de mesures entre les observations intégrées et celles prédites. Les matrices de transition et de mesure sont des jacobiniennes de  $f_{k-1}$  et  $h_k$ .

Dans notre cas, la linéarisation se fait au voisinage de la dernière valeur du vecteur d'état et non pas au voisinage d'une référence. On utilise donc le Filtre de Kalman Étendu (EKF) où les modèles d'évolution et d'observation n'ont pas besoin d'être des fonctions linéaires de l'état. La linéarisation de  $x_k$  se fait autour de  $\hat{x}_{k-1}$  et  $z_k$  est linéarisée autour de  $\hat{z}_k^-$ .

## 2.3. Couplage lâche

Dans cette stratégie, les mesures issues de la centrale inertielle et les mesures GNSS sont traitées individuellement avant d'être intégrées au filtre.

L'objectif étant d'améliorer le modèle de longueur de pas, nous ne traitons pas dans cette stratégie les informations de cap qui ne sont pas utiles et dont la détermination n'est actuellement pas optimale.

### 2.3.1. Modèle de mouvement

Le choix ayant été fait de ne pas intégrer l'information de cap au niveau du couplage lâche, nous ne pouvons donc pas intégrer les positions (E, N) d'un repère de navigation dans le vecteur d'état.

$$\begin{cases} E_{t+1} = E_t + s * \sin(\theta) \\ N_{t+1} = N_t + s * \cos(\theta) \end{cases} \quad (2.11)$$

Le vecteur d'état X du filtre de Kalman se compose donc uniquement de la fréquence de marche et des paramètres a, b et c.

$$X = \begin{bmatrix} f \\ a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Les éléments du vecteur d'état sont des variables aléatoires constantes.

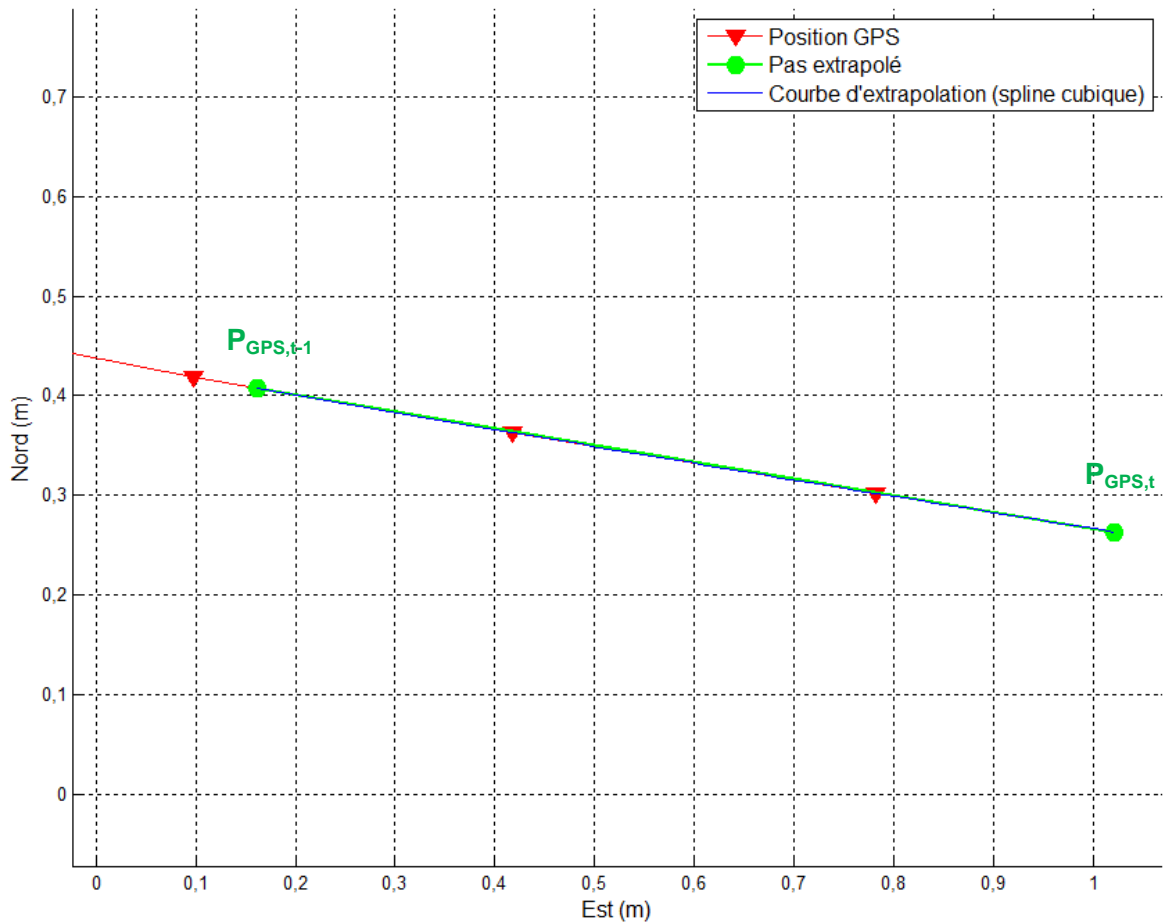
Lors de la phase de prédiction, la propagation du vecteur d'état se fait donc selon l'équation matricielle :

$$\begin{bmatrix} f \\ a \\ b \\ c \end{bmatrix}_t = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f \\ a \\ b \\ c \end{bmatrix}_{t-1} \quad (2.13)$$

### 2.3.2. Modèle de mesure

Les observations issues des accéléromètres et des gyromètres sont traitées à l'aide des algorithmes de détection de pas et nous fournissent les instants de pas ainsi que la fréquence de marche. L'autre source est le système de positionnement par satellites, en l'occurrence le GPS.

Pour obtenir les positions correspondant aux instants de pas, on utilise uniquement les coordonnées planes (Lambert 93 ou UTM30 par exemple) des positions GPS précédant le pas. En effet, en vue d'une application temps réel, le filtre de Kalman en couplage lâche s'effectue à chaque pas détecté. Les positions GPS ultérieures ne peuvent donc pas être intégrées.



**Figure 2.2 : Exemple d'extrapolation à partir des positions GPS et des instants de pas**

Le programme récupère les positions GPS avant l'instant de pas et réalise une extrapolation de type spline cubique. Sur la Figure 2.2, le segment (en vert) donne la longueur de pas et sert aussi à déterminer le cap de marche (voir l'équation (2.18)).

$$s_{GPS} = \| P_{GPS,t} - P_{GPS,t-1} \| \quad (2.14)$$

La quantité «  $s_{GPS}$  » correspond à la norme du vecteur  $\overrightarrow{P_{GPS,t} P_{GPS,t-1}}$ , il s'agit de la longueur de pas obtenue avec les points GPS interpolés aux instants de pas  $t$  et  $t-1$ . Ces longueurs de pas interpolés constituent les observations intégrées au filtre.

Ce programme est aussi utilisé afin de former la solution de référence. Les mesures effectuées par une antenne de type géodésiques sont post-traitées en différentiel, les positions obtenues en coordonnées planes sont intégrées à ce script.

La synchronisation du temps entre les données inertielles et les mesures effectuées avec les différents récepteurs GPS doit être très bonne. Il faut notamment prendre en compte la différence actuelle de 16 secondes entre le temps UTC et le temps GPS.

Les fréquences de marches issues de l'algorithme de détection de pas constituent le deuxième type d'observations intégré au filtre.

Le modèle de mesure est donc constitué de la façon suivante (Équation (2.15))



$$\begin{bmatrix} s \\ f \end{bmatrix}_k = F(X_k) + v_k \quad (2.15)$$

$$\text{où } F : (f,a,b,c) \rightarrow \begin{bmatrix} h(af + b) + c \\ f \end{bmatrix}$$

### 2.3.3. Tri des mesures

Le filtre de Kalman a besoin de mesures relativement fiables pour fonctionner. Les mesures aberrantes ne doivent donc pas être intégrées au filtre. Les positions issues de mesures GNSS intégrées dans le filtre peuvent en effet être de mauvaise qualité. En zone dégagée, lorsque l'antenne GNSS est tenue en main, le corps de la personne tenant le « smartphone » constitue un masque. De nombreux masques peuvent être présents dans les environnements dans lesquels le piéton est amené à évoluer. Les mesures doivent donc faire l'objet d'une vérification avant d'être intégrées.

Dans le filtre de Kalman, les écarts entre les prédictions et les mesures réelles forment la séquence d'innovation. Une des hypothèses du filtre pour assurer son bon fonctionnement est que la séquence d'innovation doit suivre une loi normale centrée d'écart type :

$$\sigma_{v,k} = H_k P_k H_k^T + R_k \quad (2.16)$$

Une mesure aberrante modifie la distribution de la séquence d'innovation qui n'a plus une moyenne nulle. Pour le couplage lâche, la détection de mesures aberrantes peut se faire lors du pré-filtrage.

Pour les mesures GNSS, la longueur de pas «  $s_{GPS}$  » obtenue à un instant  $t$  peut être testée, si une longueur de pas excède un certain seuil, elle ne sera pas intégrée au filtre.

En sortie de l'algorithme de cycle de marche, on dispose des instants de pas, on peut alors calculer la durée d'un pas. Une durée de pas trop importante peut être la conséquence d'un pas non détecté.

Une fois le pré-filtrage fait, la matrice de covariance  $P_k$  va permettre de mesurer la précision de l'estimation. Les écarts-types a priori sur les paramètres  $a, b$  et  $c$  utilisés pour former la matrice de covariance de mesures du filtre de Kalman ont été déterminés à l'aide d'un calcul par moindres carrés :

$$\begin{bmatrix} h^* f_1 & h & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ h^* f_n & h & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_n \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

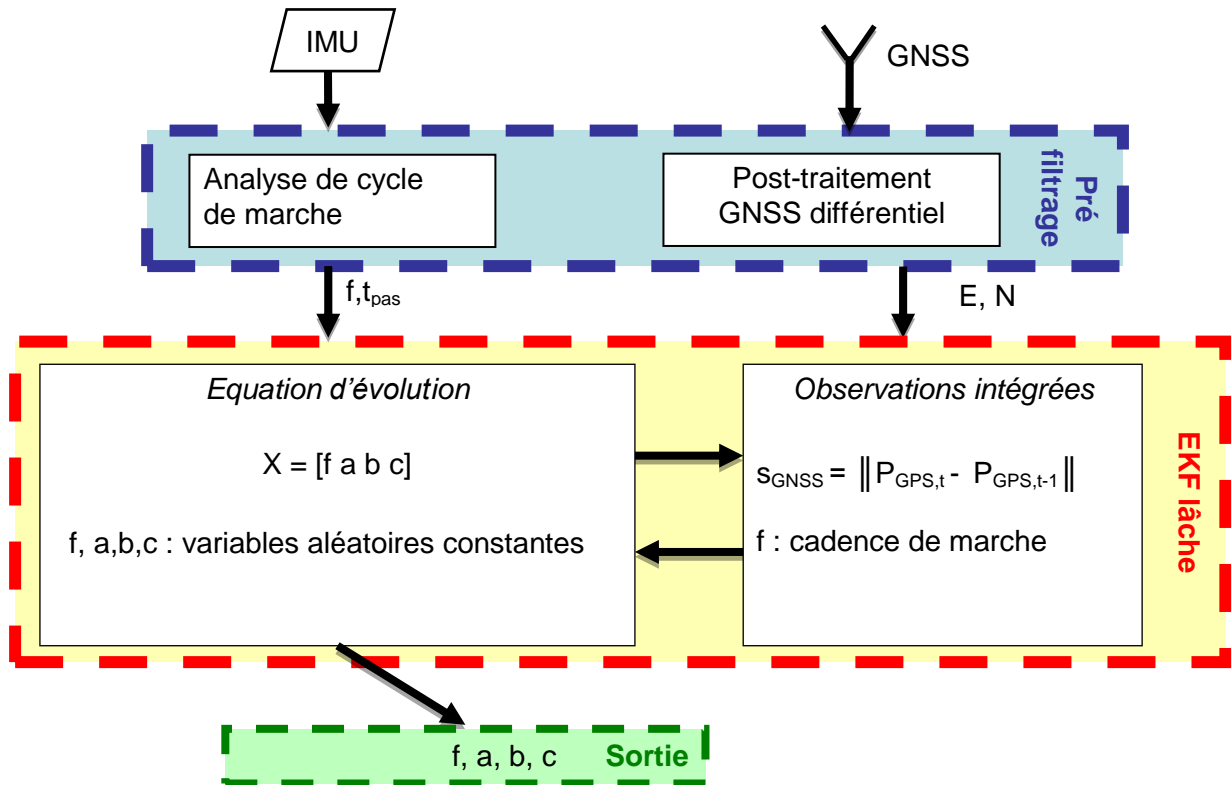


Figure 2.3 : Schéma récapitulatif du fonctionnement du couplage lâche

## 2.4. Couplage serré

En couplage serré, les observations GNSS brutes sont directement introduites. Tous les éléments du vecteur d'état sont calculés en même temps une fois les mesures introduites.

Cela constitue un avantage par rapport au couplage lâche, l'information apportée par les mesures se partage mieux entre les différents paramètres du vecteur d'état.

L'utilisation de mesures n'ayant pas fait l'objet d'un prétraitement permet également un meilleur contrôle. Dans le cas du couplage lâche, on utilise des positions obtenues à partir de plusieurs satellites, on ne peut pas gérer individuellement l'information apportée par un satellite. En outre, le nombre d'observations nécessaires au fonctionnement du filtre peut être moins élevé en couplage serré. Quatre satellites sont indispensables pour obtenir une position ; en couplage serré, il est possible d'utiliser les mesures Doppler même lorsque l'on a moins de quatre satellites disponibles.

Le couplage traite ainsi les mesures doppler et les informations de cap. Bien que celui-ci puisse traiter également les mesures brutes issues des MEMS, l'intérêt est limité car les données GNSS ne peuvent renseigner sur la qualité des données inertielles. Les mesures inertielles sont donc traitées séparément de la même façon que lors du couplage lâche.

Actuellement, il n'existe pas de méthode fiable pour la détermination du cap de marche à l'aide des données inertielles. L'étude se concentrant sur la composante « longueur de pas » de la navigation à l'estime, le choix se porte sur l'utilisation d'un cap de marche « vrai » obtenu à partir des positions GNSS issues d'un post-traitement en différentiel. L'antenne GNSS servant de référence est de type géodésique et est montée sur un casque à la différence de l'antenne bas-coût tenue dans la main à la manière d'un « smartphone ».

$$\theta_{tpas} = \arctan\left(\frac{E_{tpas} - E_{tpas-1}}{N_{tpas} - N_{tpas-1}}\right) \quad (2.18)$$

où :

$\theta_{tpas}$  est le cap de marche ;

$(E_{tpas}, N_{tpas})$  et  $(E_{tpas-1}, N_{tpas-1})$  sont les coordonnées planes à l'instant de pas et à l'instant de pas précédent (système de projection conforme).

On choisit d'attribuer la valeur du cap au temps  $t_{pas}$  soit à l'instant de fin de pas.

### 2.4.1. Modèle de mouvement

Le modèle de mouvement évolue par rapport à celui du couplage lâche et permettrait de fournir une solution de navigation s'il n'y avait pas le problème de la détermination du cap de marche évoqué précédemment.

Le vecteur d'état est composé de neuf paramètres :

$$X = [E \ N \ U \ a \ b \ c \ v_u \ \theta \ c\delta]^T \quad (2.19)$$

Avec :

$E, N$  et  $U$  : coordonnées du point dans un référentiel géographique local

$a, b$  et  $c$  : paramètres du modèle de longueur de pas

$v_u$  : vitesse verticale

$\theta$  : cap de marche

$c\dot{\delta}$  : dérive d'horloge du récepteur multipliée par la vitesse de la lumière

Les équations décrivant la propagation de l'état sont les suivantes :

$$\begin{aligned}\dot{E} &= v_h * \sin(\theta) = \frac{s}{\Delta t_{pas}} * \sin(\theta) = \frac{h(af + b) + c}{\Delta t_{pas}} * \sin(\theta) \\ \dot{N} &= v_h * \cos(\theta) = \frac{s}{\Delta t_{pas}} * \cos(\theta) = \frac{h(af + b) + c}{\Delta t_{pas}} * \cos(\theta)\end{aligned}\quad (2.20)$$

$$\dot{U} = v_u$$

$a, b, c, v_u, \theta$  et  $\dot{\delta}$  : variables aléatoires constantes ;

$\Delta t_{pas}$  : correspond à la durée du pas courant (obtenu à l'aide des instants de pas issus de l'algorithme de détection de pas).

$$\begin{bmatrix} E \\ N \\ U \\ a \\ b \\ c \\ v_u \\ \theta \\ c\dot{\delta} \end{bmatrix}_t = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \frac{hf \sin(\theta) * t}{\Delta t_{pas}} & \frac{h \sin(\theta) * t}{\Delta t_{pas}} & \frac{\sin(\theta) * t}{\Delta t_{pas}} & 0 & \frac{(ahf + bh + c) \cos \theta * t}{\Delta t_{pas}} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \frac{hf \cos(\theta) * t}{\Delta t_{pas}} & \frac{h \cos(\theta) * t}{\Delta t_{pas}} & \frac{\cos(\theta) * t}{\Delta t_{pas}} & 0 & \frac{-(ahf + bh + c) \sin \theta * t}{\Delta t_{pas}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} E \\ N \\ U \\ a \\ b \\ c \\ v_u \\ \theta \\ c\dot{\delta} \end{bmatrix}_0 \quad (2.21)$$

La variable  $t$  correspond à la durée de la mise à jour par le filtre de Kalman. Cette durée est par défaut de 0.2 seconde soit la durée entre deux mesures GPS. Le filtre va changer de fréquence lorsqu'un pas est détecté afin de réaliser une mise à jour à partir des mesures de cap récupérées lors de chaque pas.

## 2.4.2. Modèle de mesure

Les mesures GNSS intégrées ne sont pas les positions comme lors du couplage lâche mais des mesures Doppler. Celles-ci ont pour avantage d'être moins sensibles aux bruits ainsi qu'aux multi-trajets souvent présents dans les environnements dans lesquels le piéton peut évoluer.

En plus de cela, les mesures Doppler donnent des informations sur le cap, utiles pour la navigation à l'estime.

La relation entre la mesure Doppler et la vitesse du piéton dans un référentiel géocentrique est la suivante :

$$f_{doppler} = \frac{1}{\lambda_{L1}} [e_{k_x} (v_x - v_{SV,X}) + e_{k_y} (v_y - v_{SV,Y}) + e_{k_z} (v_z - v_{SV,Z}) + c\dot{\delta}] + \eta_f \quad (2.22)$$

avec :

$\lambda_{L1}$  : longueur d'onde pour la fréquence GPS L1

$e_k$  : vecteur unitaire de trajet direct entre le k-ième satellite et l'antenne GNSS

$v_{sv}$  : vitesse du satellite

$v$  : vitesse du piéton

$c\dot{\delta t}$  : dérive d'horloge du récepteur multipliée par la vitesse de la lumière

$\eta$  : bruit de mesure  
 $f$

Le référentiel le plus adapté au suivi des déplacements du piéton est le référentiel de navigation utilisant les coordonnées est, nord (E, N) et une hauteur. On passe du référentiel géocentrique au référentiel de navigation par la matrice de rotation  $R_n^g$  :

$$\begin{bmatrix} v_X \\ v_Y \\ v_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\lambda_0) & -\sin(\varphi_0) * \cos(\lambda_0) & \cos(\varphi_0) * \cos(\lambda_0) \\ \cos(\lambda_0) & -\sin(\varphi_0) * \sin(\lambda_0) & \cos(\varphi_0) * \sin(\lambda_0) \\ 0 & \cos(\varphi_0) & \sin(\varphi_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_E \\ v_N \\ v_U \end{bmatrix} = R_n^g \begin{bmatrix} v_h \sin(\theta) \\ v_h \cos(\theta) \\ v_U \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

avec :

$$v_h = \frac{h(a * f + b) + c}{\Delta t_{pas}} \quad (2.24)$$

$\lambda_0$  et  $\varphi_0$  : longitude et latitude au départ du piéton permettant l'établissement d'une matrice de rotation locale

L'équation (2.23) nécessite une linéarisation, on forme la matrice M telle que :

$$\begin{bmatrix} \delta v_X \\ \delta v_Y \\ \delta v_Z \end{bmatrix} = R_n^g \begin{bmatrix} \delta v_E \\ \delta v_N \\ \delta v_U \end{bmatrix} = R_n^g M_{3*5} \begin{bmatrix} \delta a & \delta b & \delta c & \delta v_u & \delta \theta \end{bmatrix}^T \quad (2.25)$$

avec :

$$M_{3*5} = \begin{bmatrix} \frac{hf * \sin(\theta)}{\Delta t_{pas}} & \frac{h * \sin(\theta)}{\Delta t_{pas}} & \frac{\sin(\theta)}{\Delta t_{pas}} & 0 & v_h * \cos(\theta) \\ \frac{hf * \cos(\theta)}{\Delta t_{pas}} & \frac{h * \cos(\theta)}{\Delta t_{pas}} & \frac{\cos(\theta)}{\Delta t_{pas}} & 0 & -v_h * \sin(\theta) \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Le deuxième type de mesures intégrées au filtre est le cap. Le cap vrai est obtenu à partir de la solution de référence fournie par l'antenne de type géodésique avec post-traitement. Le script présenté au paragraphe 2.3.2 permet l'obtention de ce cap.

Lors de cette seconde mise à jour, on force la remise à zéro de la vitesse verticale. L'évolution de la composante U n'est pas gérée par ce filtre.

Le modèle de mesure est le suivant :

$$\delta f = \frac{1}{\lambda_{L1}} \begin{bmatrix} e_{1,x} & e_{1,y} & e_{1,z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ e_{m,x} & e_{m,y} & e_{m,z} \end{bmatrix} R_n^g M_{3*5} [\delta a \quad \delta b \quad \delta c \quad \delta v_u \quad \delta \theta]^T + \frac{1}{\lambda_{L1}} c \dot{\delta t} + \eta_f \quad (2.27)$$

$$\theta_{pas} = \theta_{vrai}$$

### 2.4.3. Tri des mesures

Le rapport porteuse sur bruit (Carrier-to-noise Density abrégé C/N<sub>0</sub>) est un bon indicateur de la qualité d'un signal reçu par un satellite. Dès lors, on accordera plus de poids à une mesure ayant un C/N<sub>0</sub> important.

Cette prise en compte de ce rapport se fait lors de la phase de mise à jour des mesures Doppler via la matrice R<sub>k</sub> (matrice de covariance du bruit de mesure). La relation est la suivante :

$$R(i,i) = 0.7^5 * 10^{\frac{-CN0_i}{10}} \quad (2.28)$$

où :

CN0<sub>i</sub> est le rapport sur bruit associé à la mesure GPS effectuée à partir du satellite i

Concernant le cap θ présent dans le vecteur d'état, il faut prendre en compte le défaut d'alignement entre le cap vrai (référence au niveau de la tête) et le cap « Doppler » obtenu avec le récepteur GPS tenu dans la main. Cela est fait par l'introduction d'un bruit blanc de système sur l'élément θ du vecteur d'état. La propagation de la matrice de covariance du vecteur d'état se fait donc ainsi :

$$P_t = A * P_{t-1} * A' + I * \text{diag} \left[ 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \sigma_{cap}^2 \quad 0 \right] * I' \quad (2.29)$$

où

A est la matrice de transition (avec un développement de Taylor au 3<sup>ème</sup> ordre)

I est une matrice identité (9\*9).

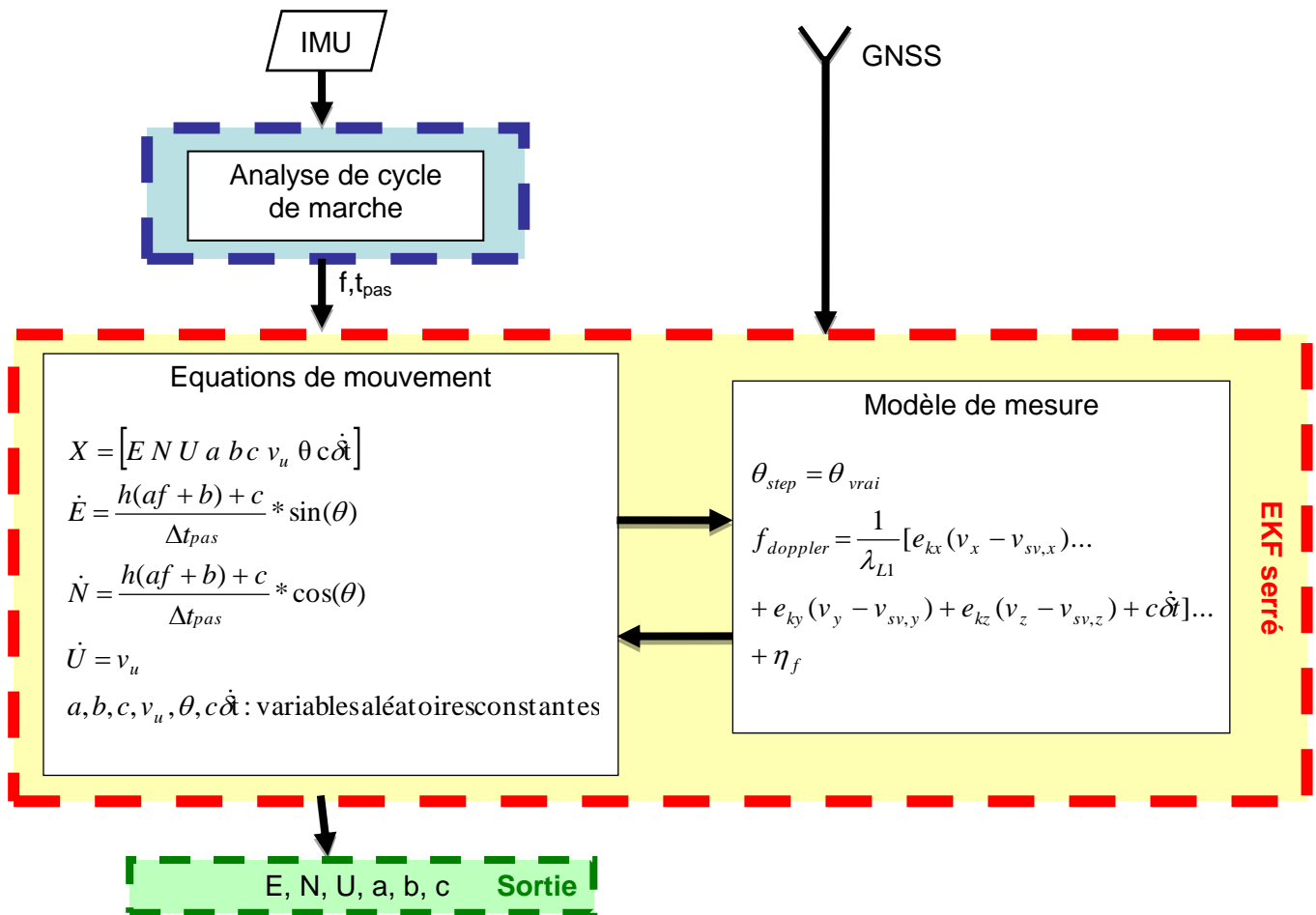


Figure 2.4 : Schéma récapitulatif du fonctionnement du couplage serré

## 3. Évaluation des performances

### 3.1. Description de l'équipement d'essai

#### 3.1.1. Mesures inertielles

Une centrale inertielle est un instrument permettant de déterminer la position dans l'espace et l'évolution de cette position. Elle est le plus souvent composée d'un accéléromètre 3 axes et d'un gyromètre 3 axes (on parle alors de centrale inertielle à 6 degrés de liberté). Certaines intègrent également un magnétomètre (9 degrés de liberté). Pour les applications de ce travail, le magnétomètre n'est pas utile. Il peut en revanche être utilisé pour la détermination du cap.

##### 3.1.1.1. Centrale inertielle ADIS

La centrale inertielle ADIS 16362 est montée sur une carte d'acquisition tenue en main par le testeur. Un récepteur Trimble copernicus est lui aussi monté sur cette carte et permet la synchronisation des mesures inertielles en temps GPS.

Cette centrale possède six degrés de liberté (accéléromètre 3 axes, gyromètre 3 axes). La fiche technique nous renseigne sur la précision que l'on peut obtenir avec cette centrale. L'unité des mesures des accéléromètres est le « g », correspondant à l'accélération de la pesanteur ( $1g=9.81m.s^{-2}$ ).

	<b>Biais au démarrage (à <math>1\sigma</math>)</b>	<b>Dérive dans le temps (à <math>1\sigma</math>)</b>	<b>Bruit de mesure (moy. quadratique)</b>
<b>Gyromètre</b>	$\pm 3^\circ/s$	0,007°/s	0,8°/s RMS
<b>Accéléromètre</b>	$\pm 6mg$	0,09 m/s/ $\sqrt{h}$	5 mg RMS

Tableau 1 : Caractéristiques techniques de la centrale utilisée (ADIS 16362)

Durant les acquisitions réalisées, la fréquence d'acquisition des mesures inertielles a été réglée sur 100Hz.

##### 3.1.1.2. Centrale inertielle de smartphone

Les premiers capteurs inertiels intégrés dans les appareils informatiques grand public ont été les accéléromètres. Ceux-ci permettaient alors de détecter une chute puis d'arrêter les disques durs mécaniques afin d'éviter les pertes de données.

Les accéléromètres ont ensuite été intégrés aux téléphones portables puis aux « smartphones » pour passer l'affichage en mode paysage ou portrait selon la façon dont l'appareil est tenu. D'autres applications sont apparues au cours du temps et le nombre de capteurs et leur qualité a augmenté.

Aujourd'hui les téléphones de type « smartphone » intègrent également des gyromètres, magnétomètres et baromètres.

Afin de réaliser les expérimentations, il est préférable d'utiliser du matériel offrant une précision supérieure à celle des équipements visés (d'où l'utilisation d'une centrale inertielle ADIS). Les modèles peuvent être ainsi validés avec des mesures de bonne qualité avant de les tester sur téléphone.



Les capteurs inertiels que l'on peut trouver dans un « smartphone » assez répandu : l'iPhone 4, sont les suivants :

	Biais au démarrage	Bruit de mesure
<b>Gyromètre</b> <b>STMicroelectronics AGD1 2022 FP6AQ</b>	$\pm 15^\circ/\text{s}$	$0.03^\circ/\sqrt{\text{Hz}}$
<b>Accéléromètre</b> <b>STMicroelectronics LIS331DLH</b>	$\pm 20\text{mg}$	$218 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$

Tableau 2 : Caractéristiques de la centrale inertielle d'un iPhone 4

Bien que les fiches techniques ne permettent pas de faire des comparaisons détaillées, on peut dire que la centrale inertielle intégrée dans ce smartphone est de moins bonne qualité que celle utilisée durant les tests.

Les algorithmes de détection de pas seront testés par la suite sur les mesures inertiels de « smartphone ». Cela permettra de se rendre compte si la précision obtenue par les centrales des « smartphones » est suffisante.

### 3.1.2. Mesures GPS

#### 3.1.2.1. Récepteur ublox

Le dispositif utilisé pour enregistrer les mesures GPS est une antenne u-blox ANN-MS avec son récepteur u-blox LEA-6T. Ce dispositif compatible avec la fréquence GPS L1 permet d'enregistrer des mesures à une fréquence de 5 Hz. Un pas durant approximativement 0.5 s, environ deux mesures sont prises à chaque pas. Cela permet de pouvoir interpoler comme cela est expliqué précédemment (Figure 2.2).



Figure 3.1 : Récepteur et antenne ublox utilisés

#### 3.1.2.2. Récepteur DLV3

Un récepteur Novatel DLV3 a été utilisé pour former la solution de référence de la solution. Deux antennes de type géodésiques ont été utilisées, tout d'abord l'antenne Novatel GPS-702-GG puis une antenne beaucoup plus compacte, une Antcom G5 multifréquence. Cette nouvelle antenne a permis de rendre la démarche des testeurs plus naturelle.

#### 3.1.2.3. Station de base

La station de base est positionnée sur un point connu à proximité de la zone de test. La ligne de base est donc très courte, permettant d'obtenir une précision d'un centimètre sur les composantes est et nord et de deux centimètres sur la hauteur.

### 3.1.2.4. GPS intégré de « smartphone »

De nombreuses applications disponibles sur les « smartphones » se basent sur la localisation. Une localisation approximative peut être faite grâce aux antennes relais mais aussi les points d'accès Wi-Fi. Pour avoir une localisation précise en extérieur, les « smartphones » sont équipés de modules GPS.

La grande majorité des « smartphones » utilisent le système A-GPS (GPS Assisté). Ce système a été créé pour rendre la période d'initialisation plus rapide. Cela est rendu possible par le téléchargement des éphémérides par le réseau mobile et non pas avec le signal envoyé par le satellite qui est lente à télécharger et a une durée de vie limitée.

Le A-GPS [9] est composé de deux modes :

- MSA : « mobile station assisted »
- MSB « mobile station base »

Dans le premier mode, les informations d'orbites sont envoyées par le serveur au dispositif qui acquiert les signaux des satellites visibles et les calculs sont effectués par le serveur. Le deuxième mode utilise uniquement le serveur pour fournir les données des satellites visibles, les calculs sont faits par le « smartphone ».

Ce système est souvent associé à un récepteur GPS de type HS-GPS (High Sensitivity GPS) qui permet l'utilisation des signaux GPS faibles. Ils sont utiles dans des environnements où des masques sont présents et permettent même d'obtenir des positions en intérieur.

Le « Precise Point Positioning » (PPP) pourra peut-être améliorer la précision des mesures faites par les récepteurs intégrés dans les « smartphones ». Cette méthode nécessite une très bonne modélisation des erreurs induites par la traversée de l'ionosphère (possible grâce à des services comme EGNOS : European Geostationary Navigation Overlay Service).

Des solutions PPP existent avec des récepteurs de type mono-fréquence, ce type de récepteurs pourrait être placé dans un « smartphone ».

## 3.2. Protocole expérimental

Les différents essais se sont déroulés sur une boucle de 180 mètres, équipement qui servait auparavant à tester les solutions RTK des différents constructeurs le long d'un monorail. Au centre de cette boucle se situe donc un pilier pour pouvoir installer une station de base.



Figure 3.2 : Vue aérienne de la zone d'essai (Google Maps)

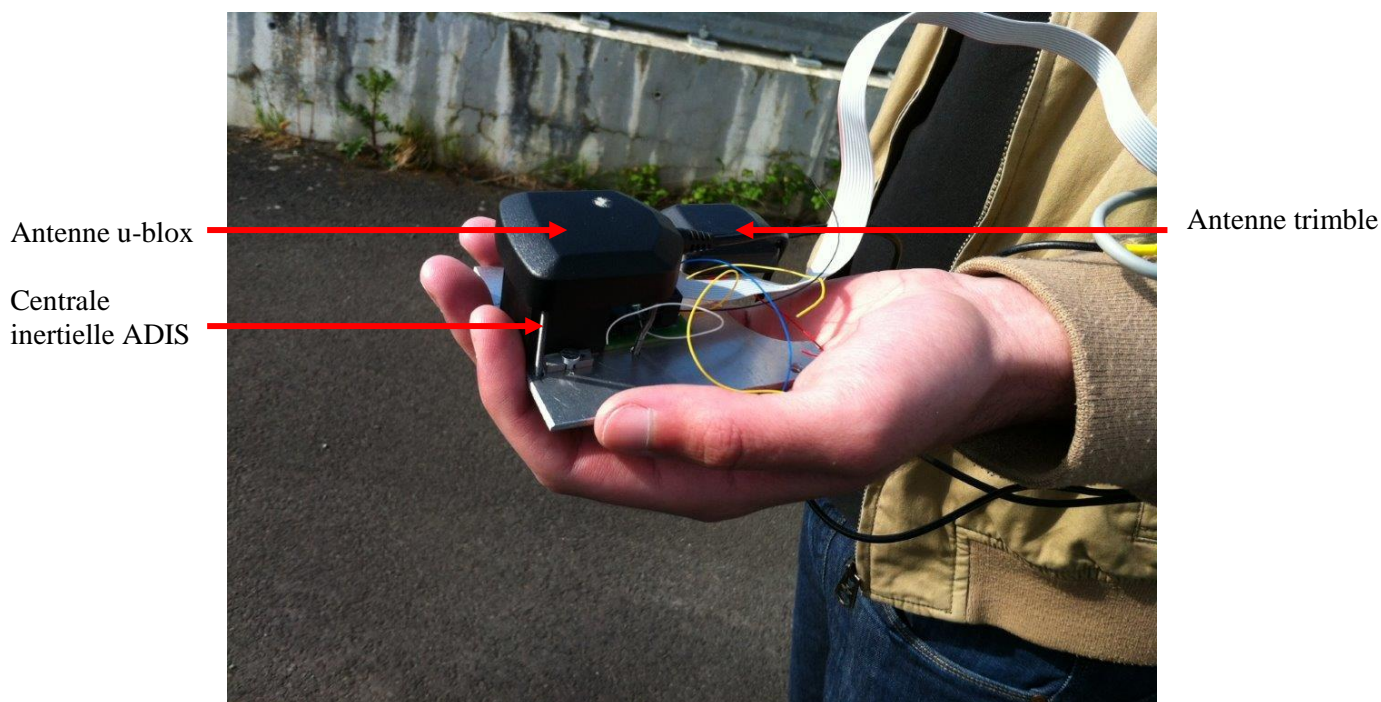


Figure 3.3 : Photographie du dispositif expérimental

Les testeurs sont équipés d'une plaque sur laquelle sont montés les différents capteurs. Ceux-ci sont reliés à une carte d'acquisition regroupant les récepteurs GPS et stockant l'ensemble des mesures inertielles et GPS.

Il est demandé aux testeurs d'effectuer deux tours de piste en « texting mode », cela correspond aux situations où un utilisateur marche en fixant des yeux son téléphone. C'est le cas par exemple lorsque l'on suit un itinéraire. Le dernier tour est effectué en « swing », le testeur effectue alors un mouvement de balancier du bras avec le dispositif tenu dans la main, il s'agit donc d'une marche naturelle.

Ces mesures servent à la fois pour le couplage lâche et le couplage serré, ce qui va permettre d'effectuer des comparaisons sur les deux approches.

## 4. Résultats et analyse

Cette partie décrit les résultats expérimentaux obtenus à partir des modèles présentés (couplage lâche et couplage serré).

Plusieurs critères sont utilisés pour valider le modèle :

- **La précision de la détermination de la longueur de pas** : une fois les paramètres calibrés, on applique le modèle (rappelé dans l'équation (4.1)) à toutes les fréquences de pas issues de l'algorithme de détection de pas. On dispose donc d'une longueur de pas associée à l'ensemble des instants de pas.

Les pas de référence sont obtenus à partir des positions GNSS post-traitées en différentiel, le programme présenté au paragraphe 2.3.2 extrapole ces positions aux instants de pas.

La comparaison porte sur les longueurs de pas de référence et les longueurs de pas obtenues avec les paramètres calibrés, les paramètres universels sont aussi testés pour justifier la nécessité de la calibration. La moyenne des longueurs de pas de référence sera comparée avec celle des longueurs de pas avec les paramètres calibrés. La distance totale parcourue (correspondant à la somme des longueurs de pas) est le critère principal de validation du modèle. En effet, en navigation à l'estime, on s'intéresse davantage à l'évolution dans le temps (au bout d'un certain nombre de pas) plutôt qu'à la précision de la détermination d'une longueur de pas.

- **Temps nécessaire pour la convergence des paramètres** : l'objectif étant de répéter la calibration pour s'adapter aux différents états du piétons (fatigue, blessure), il est intéressant de connaître cette durée.
- **Compatibilité avec un fonctionnement « temps-réel »** : une solution de navigation doit permettre de géolocaliser l'utilisateur quasi instantanément

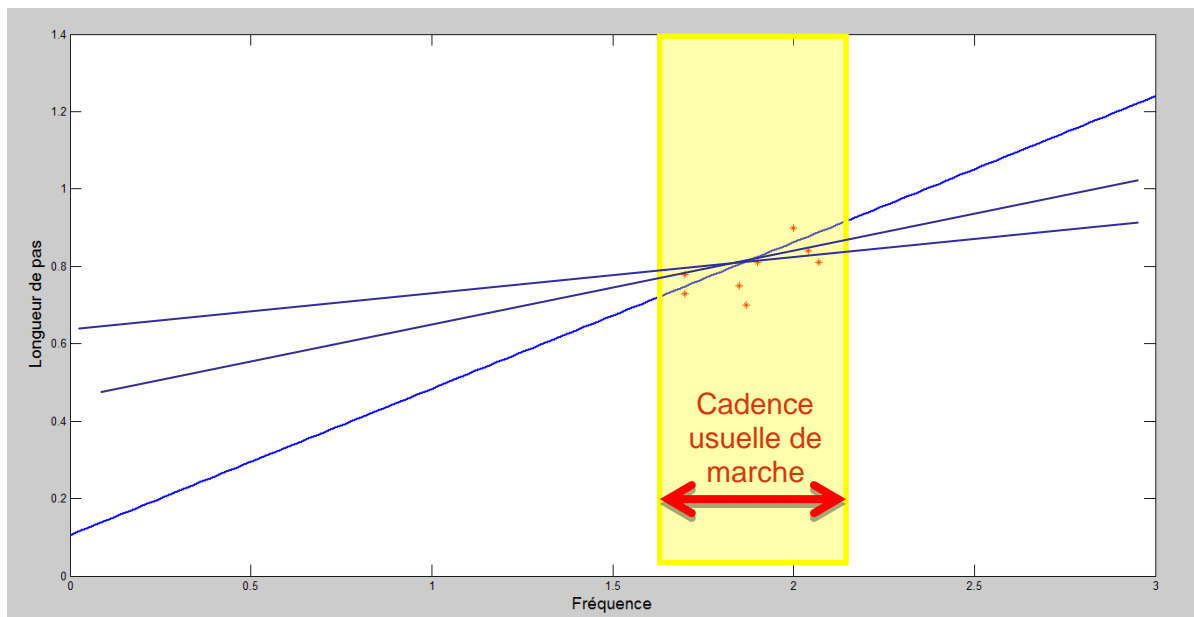
### 4.1.1. Problèmes rencontrés

#### 4.1.1.1. Solutions multiples

Dans la formule ci-dessous, on peut voir que la longueur de pas est principalement influencée par la fréquence de marche qui constitue la seule variable pour un individu.

$$s = h(a * f + b) + c \quad (4.1)$$

La valeur ' $a*h$ ' va donc être le coefficient directeur de la fonction affine liant la longueur de pas à la fréquence de marche. L'illustration ci-après (Figure 4.1) illustre le fait que le paramètre ' $a$ ' doit rester dans un certain intervalle pour ne pas avoir d'aberrations entre la fréquence et la longueur de pas.



**Figure 4.1 : Schéma explicatif : solutions multiples**

Afin d'éviter d'avoir des problèmes de cet ordre, on peut calibrer le modèle en observant une large bande de fréquence. L'autre solution est d'autoriser peu de variation sur le paramètre ' $a$ ' à travers l'écart-type présent dans la matrice P des filtres présentés.

#### 4.1.1.2. Marche naturelle

L'équipement de test ne doit pas être la cause d'une marche peu naturelle. Les premières séries de mesures ont été réalisées avec l'antenne Novatel Nov702 GG montée sur un casque porté par le testeur. Le poids de l'antenne provoquant un certain inconfort, les tests réalisés avec ce matériel ont été la source d'interrogations mais ont montré des résultats intéressants.

Les longueurs de pas obtenues avec ces jeux de données sont inférieures à la moyenne généralement observée pour des testeurs de gabarit identique. Le poids de l'antenne (~500 grammes) constitue donc une gêne.

La nouvelle antenne reçue en cours de stage étant beaucoup plus compacte (162 grammes), la démarche des testeurs a été plus naturelle. La longueur de pas moyenne obtenue est supérieure pour un même individu sur ces jeux de données.

Les paramètres du modèle de pas obtenus diffèrent donc selon que l'on utilise une antenne ou l'autre. Cet élément confirme le fait que les paramètres doivent être recalibrés à plusieurs reprises pour prendre en compte des changements dans la démarche de l'utilisateur. Si celui-ci porte un équipement lourd ou que sa démarche est modifiée par une blessure ou la fatigue, les paramètres doivent s'adapter pour conserver une estimation de longueur de pas fiable.

#### 4.1.1.3. Fréquence des mesures GPS d'un smartphone

Les exports des données du « smartphone » ont été effectués via l'application Sensor Data disponible sur iOS. L'ensemble des exports se présente dans un tableau avec les instants de mesures (à une fréquence de 100 Hz). Les valeurs des mesures GPS ne changent pas à tous les instants de mesures, elles évoluent seulement toutes les secondes (1 Hz) alors que la puce disponible indique une fréquence supérieure à 2 Hz.

La classe « CoreLocation » développée par Apple pour les développeurs d'applications permet d'obtenir les informations de localisation (coordonnées géographiques dans le système WGS84, vitesse, information de précision...) seulement avec une mise à jour toutes les secondes. Cela n'est pas suffisant pour le modèle décrit lors du couplage lâche car un pas dure environ une demi-seconde.

Les mesures Doppler ne sont pas exportables sur le « smartphone » sur lequel les essais ont été faits. Les appareils évoluant rapidement, l'amélioration de la précision, de la fréquence et de l'accessibilité des mesures est envisageable.

#### 4.1.2. Résultats du couplage lâche

Pour rappel, ce couplage utilise comme mesures les sorties de l'algorithme de détection de pas, à savoir les instants de pas, la cadence de marche, et des positions GPS en coordonnées planes.

L'efficacité de ce couplage est donc directement liée à la qualité du positionnement. L'objectif final étant l'implémentation de ces algorithmes sur des appareils de type « smartphone », il faut que les mesures utilisées soient comparables à celles de ces appareils.

Le choix s'est donc porté sur les mesures en positionnement absolu du récepteur u-blox. Le filtrage n'intègre pas les positions mais utilise les positions GPS pour déterminer une longueur de pas. Ainsi, si l'erreur de mesure est constante sur une série de mesure, il serait possible d'obtenir des longueurs de pas à intégrer au filtre suffisamment précises pour calibrer les paramètres.

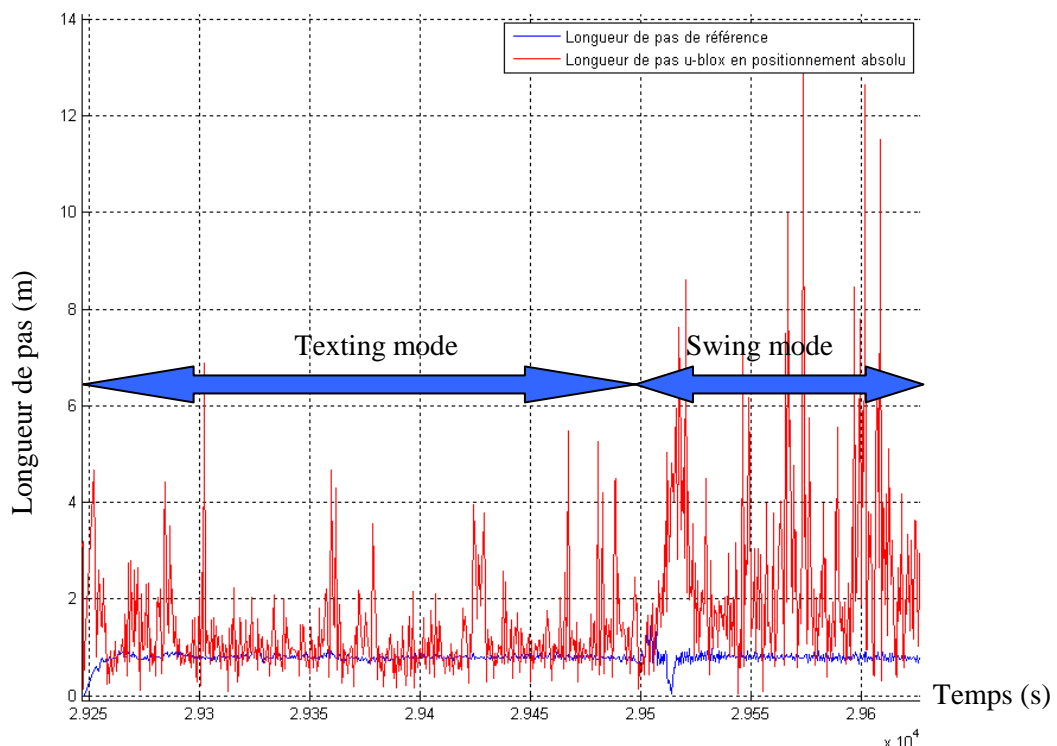


Figure 4.2 : Comparaison entre les longueurs de pas de référence et celle obtenues en positionnement absolu

Sur la figure ci-dessus, on peut voir que les mesures en mode « swing », c'est-à-dire avec un mouvement de balancier de la main sont inexploitables. En effet, l'oscillation du bras peut engendrer des mesures dans le sens opposé à celui de la marche.

On se concentre donc sur les parties en mode « texting » soient des parties où l'appareil est fixe dans le référentiel formé par le piéton. La calibration sera effectuée uniquement en mode « texting » et pourra être utilisée lors des phases de « swing » lors desquelles le modèle sera appliqué.

En utilisant les mesures en positionnement absolu, on s'aperçoit que même si les longueurs de pas semblent osciller autour d'une valeur, cette valeur semble supérieure à la valeur vraie. Les mesures ne sont pas suffisamment précises pour que le filtre converge vers des valeurs correctes.

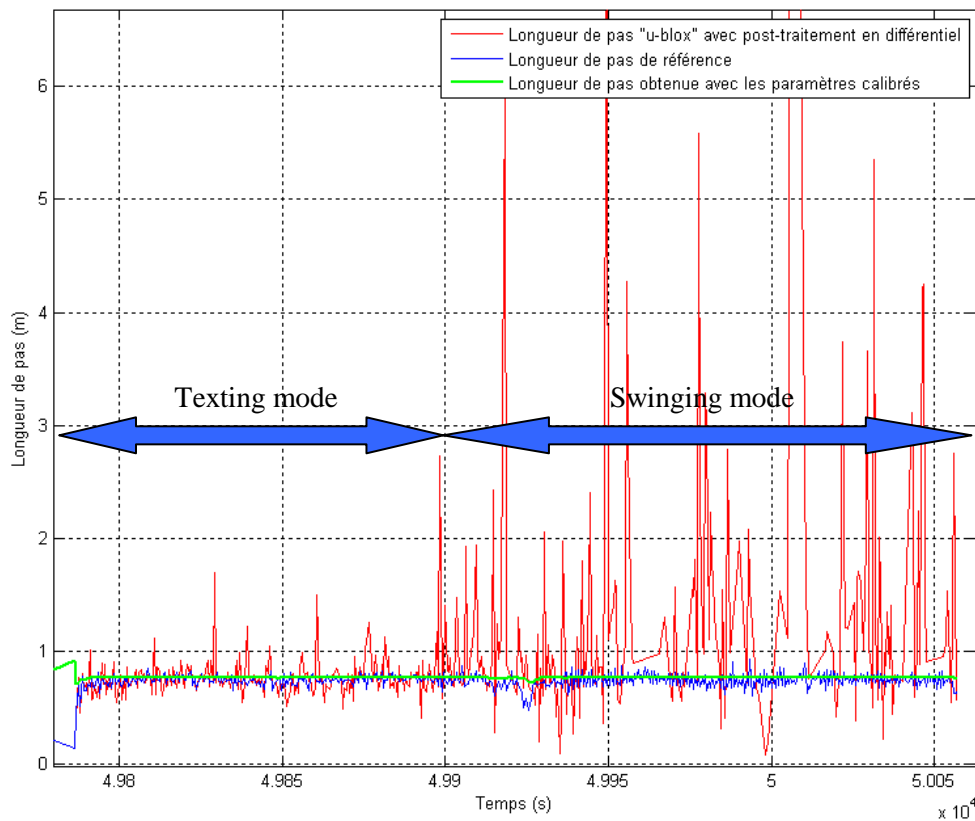
Des tests ont été réalisés pour écarter les longueurs de pas aberrantes. Ceux-ci ne suffisent pas pour obtenir une solution satisfaisante. D'après le tableau ci-après, les paramètres calibrés donnent un moins bon résultat qu'avec les paramètres universels.

<b>Jeu de données</b>	<b>Positionnement absolu</b>
Longueur de pas moyenne issue de la calibration (m)	0,91
Longueur de pas de référence (m)	0,78
Longueur de pas avec les paramètres universels (m)	0,88
Longueur totale parcourue (paramètres calibrés) (m)	337,1
Longueur totale de référence (m)	291,19
Pourcentage d'erreur sur la distance totale	<b>15,8%</b>
Longueur totale parcourue (paramètres universels) (m)	326,04
Pourcentage d'erreur sur la distance totale	12,0%

**Tableau 3 : Résultats du couplage lâche (positionnement absolu)**

Le modèle a ensuite été testé avec les mêmes mesures mais avec un post-traitement en différentiel avec la station de base. On s'éloigne donc d'une solution temps réel mais la précision obtenue avec post-traitement sera peut être accessible prochainement par l'utilisation du PPP comme décrit précédemment.





**Figure 4.3 : Longueurs de pas obtenues avec post-traitement des mesures du u-blox**

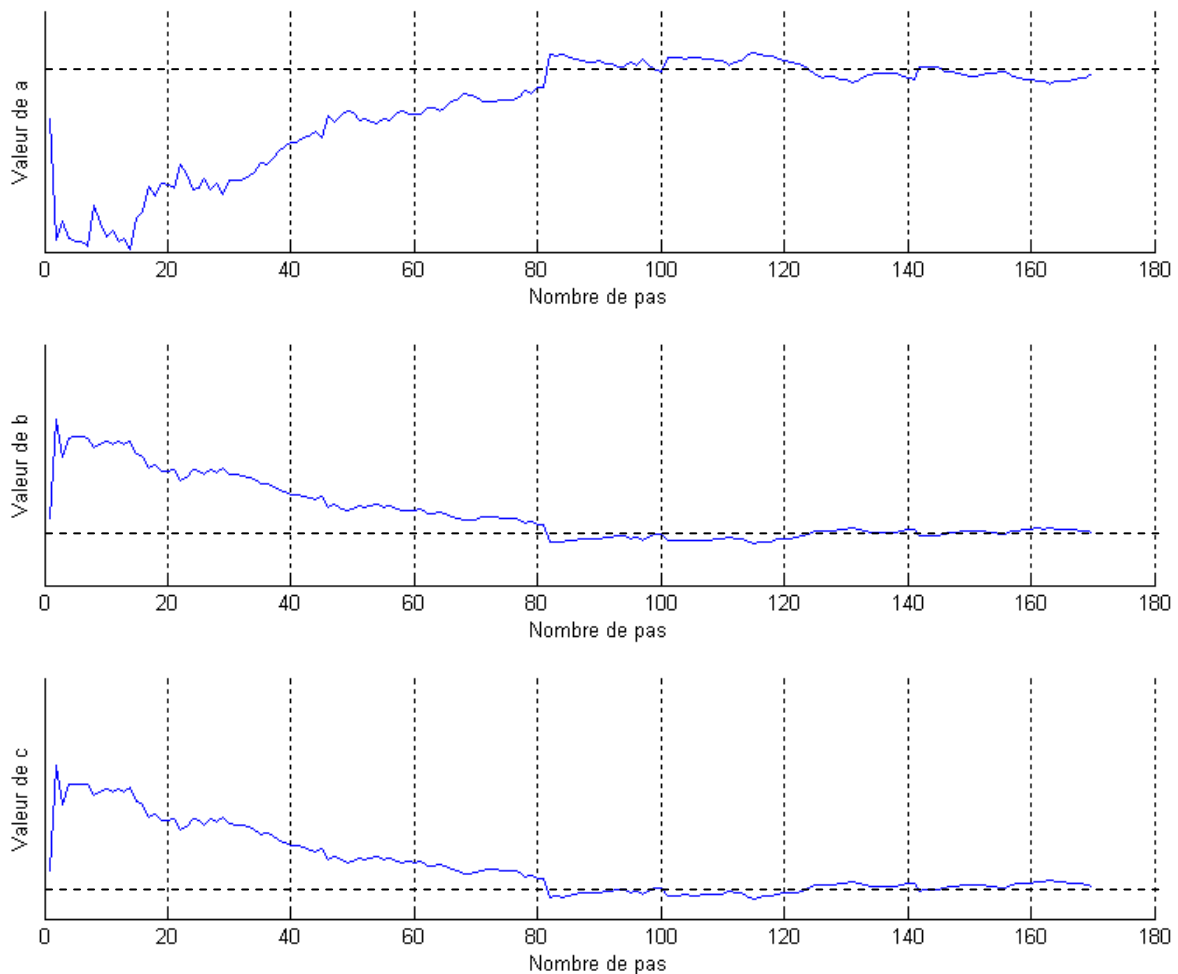
L'antenne u-blox étant de moins bonne qualité que celle utilisée par la référence, les longueurs de pas oscillent de façon plus marquée (Figure 4.3). Cette baisse de précision s'explique également par le fait que le corps du piéton constitue un masque lorsque le téléphone est tenu dans la main.

Jeu de données	1	2	3	4	5	6	7
Longueur de pas moyenne issue de la calibration (m)	0,75	0,71	0,85	0,78	0,79	0,74	0,87
Longueur de pas de référence (m)	0,76	0,74	0,83	0,77	0,79	0,73	0,85
Longueur de pas avec les paramètres universels (m)	0,76	0,87	0,93	0,82	0,88	0,83	0,95
Longueur totale parcourue (paramètres calibrés) (m)	328,89	363,16	335,52	347,43	519,84	541,57	562,8
Longueur totale de référence (m)	335,36	376,91	327,45	344,11	515	530,82	549,54
Pourcentage d'erreur sur la distance totale calibrée	<b>-1,9%</b>	<b>-3,6%</b>	<b>2,5%</b>	<b>1,0%</b>	<b>0,9%</b>	<b>2,0%</b>	<b>2,4%</b>
Longueur totale parcourue (paramètres universels) (m)	333,4	442,48	369,1	365,95	574,5	604,44	613,18
Pourcentage d'erreur sur la distance totale (paramètres universels)	-0,6%	17,4%	12,7%	6,3%	11,6%	13,9%	11,6%

**Tableau 4 : Tableau récapitulatif du couplage lâche, comparaison avec la référence et l'utilisation de paramètres universels**

Le Tableau 4 ci-dessus démontre que l'on observe une nette amélioration sur la détermination de la longueur de pas lorsque les paramètres ont été calibrés.

Un autre indicateur est important pour la validation de cette méthode est le temps nécessaire pour l'obtention d'un jeu de paramètres personnalisés précis. En effet, ce jeu de paramètres est amené à évoluer au cours du temps pour s'adapter au mieux à l'individu. Une convergence rapide permet d'envisager une calibration avant d'entrer dans un bâtiment où les mesures GPS seront inaccessibles.



**Figure 4.4 : Évolution des paramètres durant le filtre en couplage lâche**

Sur ce jeu de données, la convergence est obtenue au bout de 80 pas effectués soit une durée d'à peu près 40 secondes. La convergence est observée de manière graphique et n'a pas fait l'objet d'une détection automatique par l'utilisation d'un seuil de variation maximal autorisé entre deux valeurs successives. On obtient des durées de convergence similaires sur les autres jeux de données.

Sans perdre des yeux le fait que l'on utilise des mesures GPS post-traitées, les résultats décrits valident le modèle utilisé.

Les inconvénients de cette méthode sont qu'en l'état actuel, les mesures GPS effectuées par les « smartphones » sont insuffisamment précises. Les pseudo-distances enregistrées par les récepteurs bas-coût sont fortement biaisées par la présence de masques formés par les bâtiments ainsi que les multi-trajets. Ces inconvénients ne se retrouvent pas dans les mesures Doppler, leur utilisation sera donc explorée dans la calibration en couplage serré.

### 4.1.3. Résultats du couplage serré

#### 4.1.3.1. Description de l'algorithme

La stratégie en couplage serré est a priori plus prometteuse, les mesures Doppler étant moins sensibles aux bruits et aux multi-trajets. De plus elles apportent des informations de cap.

Ce filtre de Kalman a deux types de mises à jour : les mises à jour Doppler à une fréquence de 5 Hz dans le cas présent et les mises à jour lors de détection de pas qui apportent une information de cap et « forcent » la mise à jour de la vitesse verticale à 0. Les mesures Doppler utilisées sont celles du récepteur ublox tenu en main.

Le vecteur d'état de ce filtre intègre la position (E, N, et U), il est donc possible de l'utiliser comme un système de navigation. En navigation à l'estime, les différents paramètres sont par définition estimés, les positions par exemple sont relatives.

Il est courant d'apporter à ces estimations des corrections soit en intégrant des positions absolues (coordonnées GPS d'un point, altitude à l'aide d'un baromètre utilisé en tant qu'altimètre...), soit en apportant des corrections sur une dérive d'un capteur. Dans ce travail, aucune correction de ce type n'a été opérée.

L'algorithme a été pensé pour pouvoir fonctionner en temps réel, cependant, pour cette application, quelques prétraitements sont effectués. En effet, les caps utilisés sont des caps « vrais » qui ont besoin d'être calculés avant l'exécution du script. Des programmes servant à la bonne organisation des observations tels que l'extraction des mesures Doppler à partir de fichiers bruts sont eux aussi exécutés avant le filtre en lui-même.

Le fonctionnement de celui-ci est schématisé ci-après (Figure 4.5).

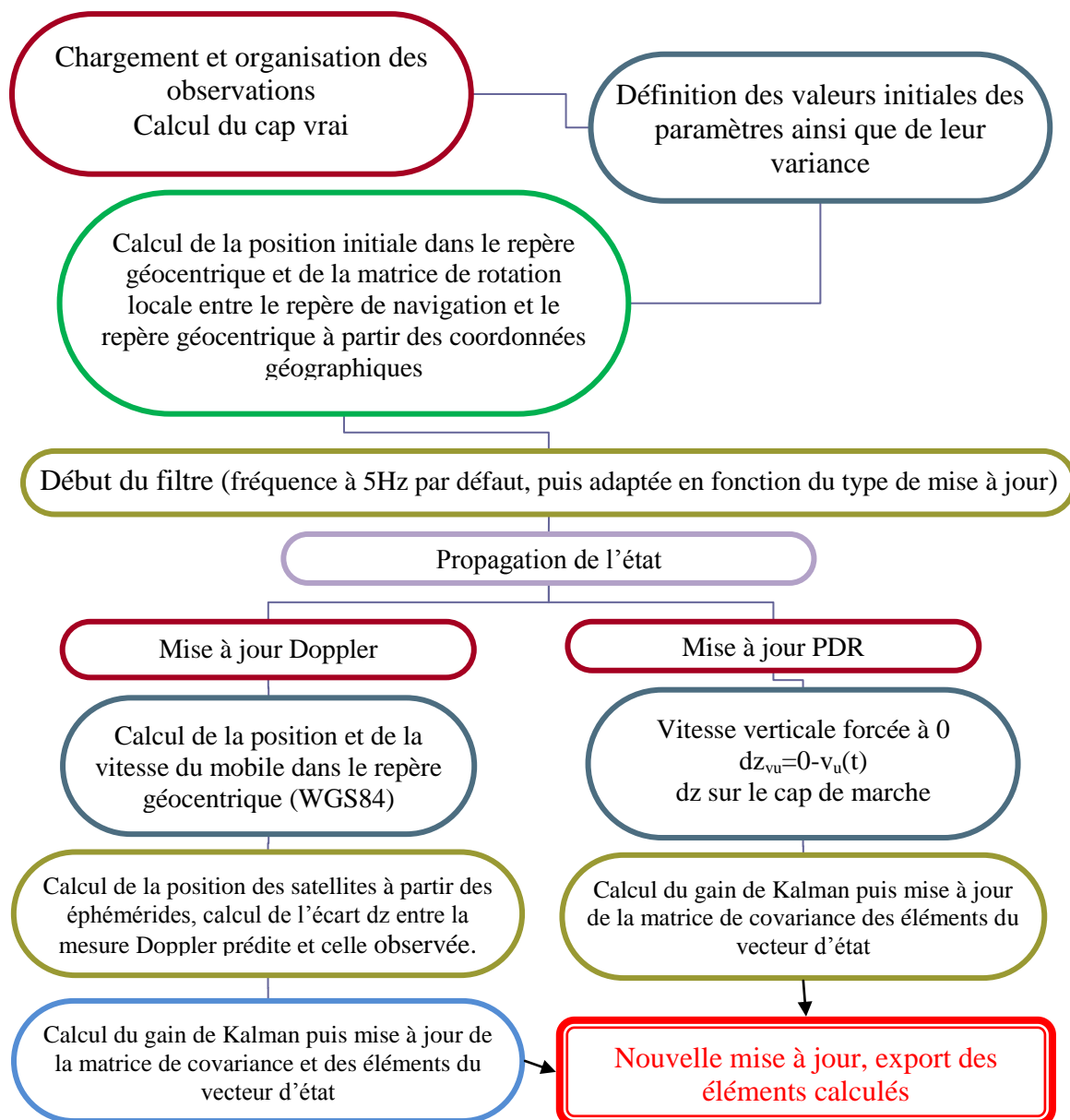
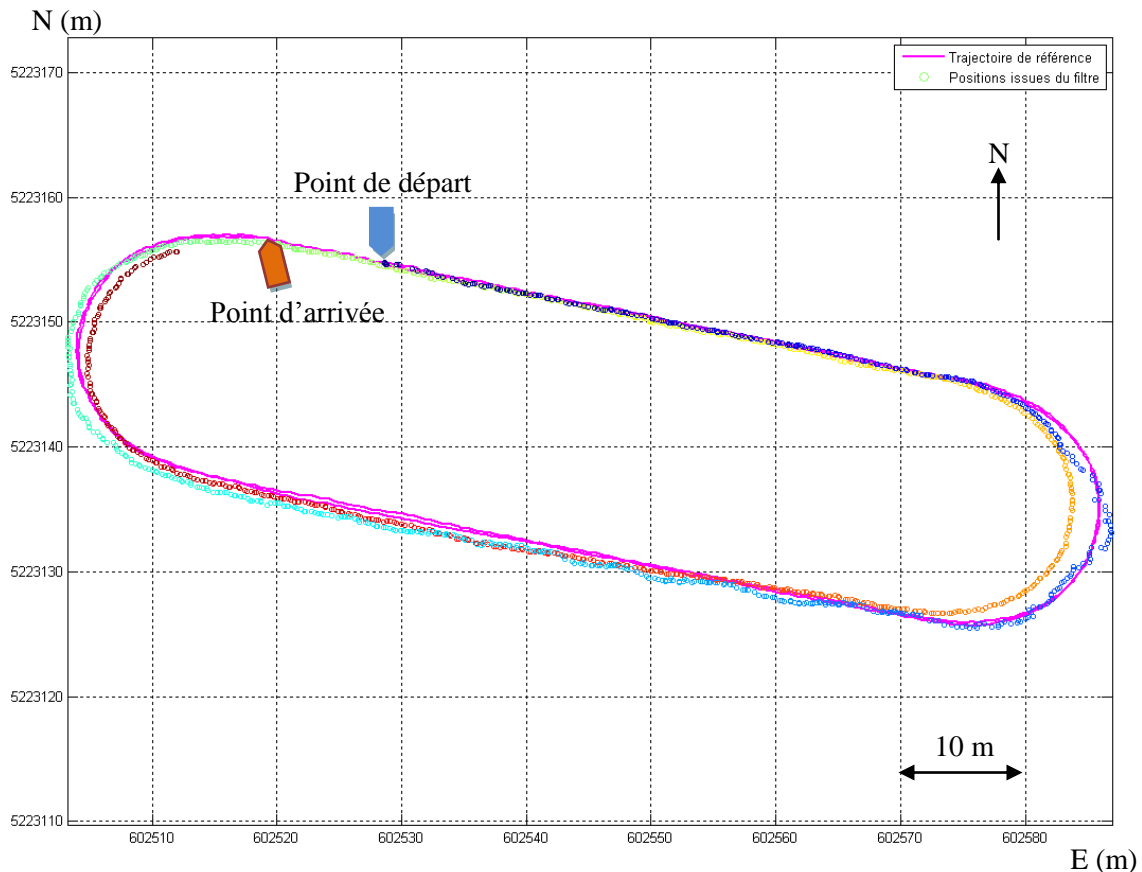


Figure 4.5 : Schématisation des principales étapes du script du couplage serré

#### 4.1.3.2. Utilisation en tant que système de navigation

Les positions mises à jour tout au long du déroulement du script sont enregistrées et peuvent être confrontées aux positions de la solution de référence.



**Figure 4.6 : Utilisation du filtre en tant que solution de navigation**

Sur la figure ci-dessus, l'évolution de la position par rapport au temps est indiquée par la variation de la couleur du bleu au vert puis à l'orange jusqu'au marron. Le premier tour est effectué en « texting » mode et le second en « swing ».

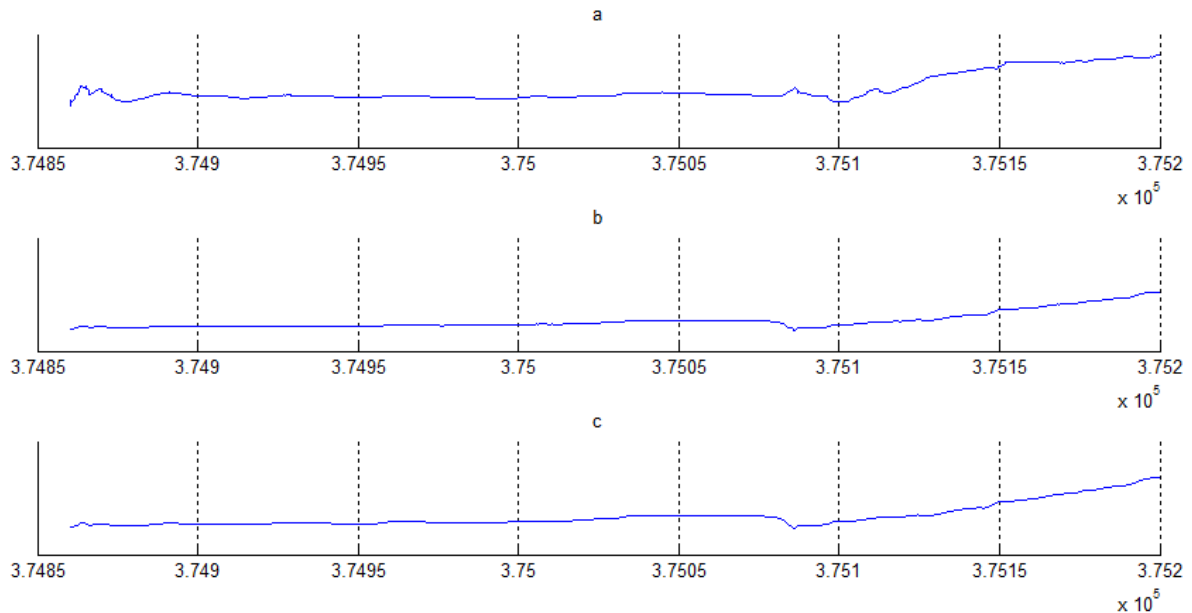
Lors du premier tour, les positions issues du filtre se superposent quasi parfaitement avec les positions de référence. Lors du deuxième tour, le mouvement de balancier du bras entraîne des mesures plus compliquées à exploiter, le mouvement du bras pouvant être dans le sens contraire à celui de la marche. Le cap utilisé étant un cap vrai, on ne remarque pas spécialement de gros écarts sur la trajectoire mais sur la distance parcourue, ces écarts sont perceptibles. On le voit sur la figure où l'écart entre les positions de la référence et du filtre lors du virage (en orange) est important. De la même façon, l'écart entre le point d'arrivée de la référence et celui de sortie de filtre est conséquent (~8 m).

Cette complexité de traitement des mesures Doppler lors de phases de « swing » sera également constatée lors de l'utilisation du filtre pour la calibration des paramètres du modèle de marche.

#### 4.1.3.3. Utilisation à des fins de calibration

Les mesures Doppler sont difficilement exploitables en phase de swing et ne sont peu voire pas disponibles à l'intérieur des bâtiments (un High-Sensitivity GPS permet parfois d'acquérir des signaux GPS de faible intensité même à l'intérieur). L'algorithme de détection de pas permet de détecter ces phases de swing et fonctionne aussi bien à l'extérieur qu'en intérieur.

Il semble donc qu'il faille utiliser ce filtre plutôt pour la calibration des paramètres lorsque les mesures Doppler sont accessibles et que le « smartphone » est globalement fixe dans le référentiel du piéton : « texting » mode (tenu en main et suivant des indications, dans une poche, dans un sac...). Comme pour la calibration en couplage lâche, on s'intéressera aussi bien à la qualité des paramètres calibrés qu'à la durée nécessaire pour obtenir une convergence.



**Figure 4.7 : Évolution des paramètres du modèle de marche sur trois tours de piste (2 en « texting » et un en « swing »)**

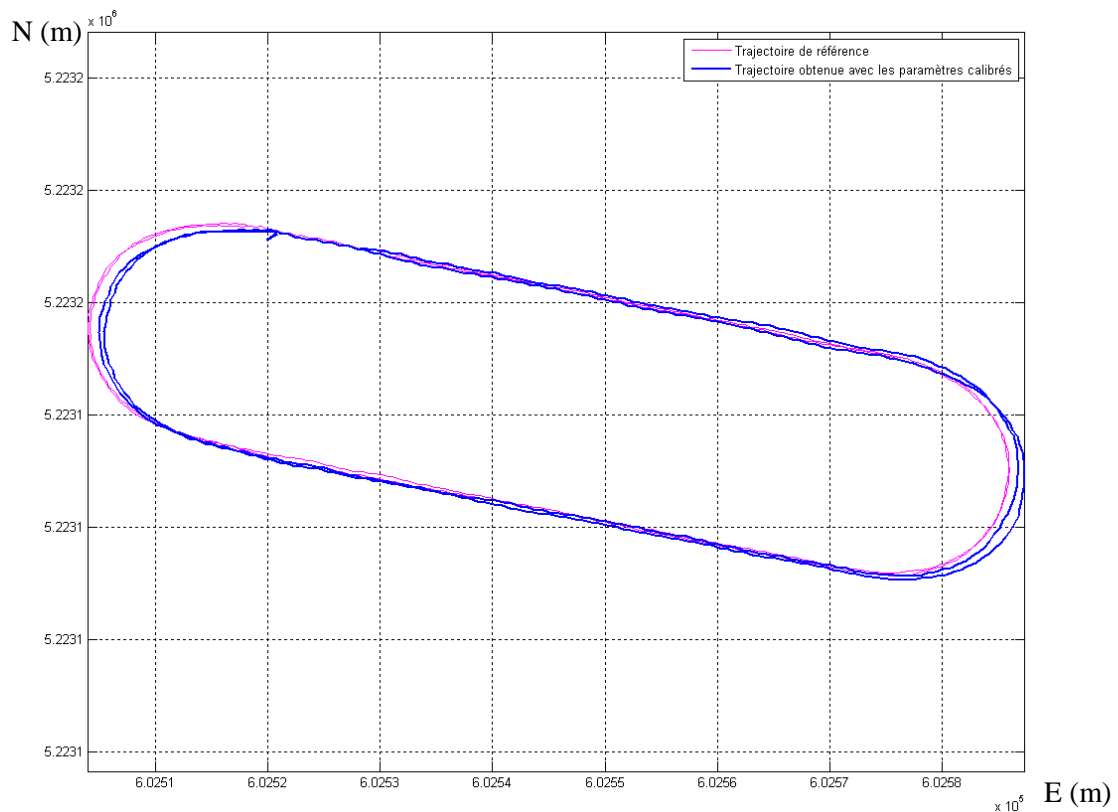
Après une courte période de variations (à peu près 20 secondes), la convergence des paramètres est obtenue. Cette durée de convergence est compatible avec les applications envisagées (calibration avant l'entrée dans un bâtiment par exemple).

Le graphique précédent (Figure 4.7) confirme également que la calibration des paramètres lors d'une phase de swing est peu envisageable.

Les valeurs des paramètres du modèle de marche (a,b et c) en sortie de filtre sont enregistrées, ils permettent d'obtenir les positions E, N aux instants de pas détectés par le processus de détection de pas. Là encore, le cap vrai est utilisé :

$$\begin{cases} E_{t+1} = E_t + s * \sin(\theta_{t+1}) = E_t + [h(a * f_{t+1} + b) + c] * \sin(\theta_{t+1}) \\ N_{t+1} = N_t + s * \cos(\theta_{t+1}) = N_t + [h(a * f_{t+1} + b) + c] * \cos(\theta_{t+1}) \end{cases} \quad (4.2)$$

En choisissant des coordonnées initiales ( $E_0, N_0$ ) égales aux coordonnées planes à  $t_0$ , on obtient la Figure 4.8. On peut ainsi comparer les coordonnées obtenues à la référence. Ces paramètres sont appliqués à la fois sur les phases de « texting » et de « swing ». La solution de référence étant placée sur une casquette portée par le testeur, les caps vrais ne sont pas perturbés par le mouvement du bras lors des phases de « swing ».



**Figure 4.8 : Trajectoire obtenue avec les paramètres du modèle de pas issus de la calibration**

La Figure 4.8 illustre la bonne performance du filtre en couplage serré. Le Tableau 5 confirme ce résultat avec de nettes améliorations par rapport à l'utilisation des paramètres universels excepté pour le jeu de donnée n° 1.

L'ensemble des pourcentages d'erreur sur la distance parcourue sont inférieurs à 5%. De meilleurs résultats pourraient être obtenus par le renforcement de la robustesse du filtre vis-à-vis de mesures aberrantes.

Jeu de données	1	2	3	4	5	6	7
Longueur de pas moyenne issue de la calibration (m)	0,727	0,721	0,849	0,758	0,804	0,752	0,843
Longueur de pas de référence (m)	0,764	0,739	0,827	0,768	0,785	0,726	0,852
Longueur de pas avec les paramètres universels (m)	0,759	0,868	0,932	0,817	0,876	0,827	0,951
Longueur totale parcourue (paramètres calibrés) (m)	319,34	367,58	336,32	339,35	505,03	549,76	543,727
Longueur totale de référence (m)	335,36	376,91	327,45	344,11	515	530,82	549,54
Pourcentage d'erreur sur la distance totale calibrée	<b>-4,8%</b>	<b>-2,5%</b>	<b>2,7%</b>	<b>-1,4%</b>	<b>-1,9%</b>	<b>3,6%</b>	<b>-1,1%</b>
Longueur totale parcourue (paramètres universels) (m)	333,4	442,48	369,1	365,95	574,5	604,44	613,18
Pourcentage d'erreur sur la distance totale (paramètres universels)	-0,6%	17,4%	12,7%	6,3%	11,6%	13,9%	11,6%

**Tableau 5 : Tableau récapitulatif du couplage serré, comparaison avec la référence et l'utilisation de paramètres universels**

#### 4.1.4. Autre résultat (test avec la centrale inertielle de l'iPhone 4)

Des tests ont été menés pour évaluer la qualité des centrales inertielles présentes dans les « smartphones ». La Figure 4.9 est une représentation graphique des résultats issus de l'algorithme de détection de pas.

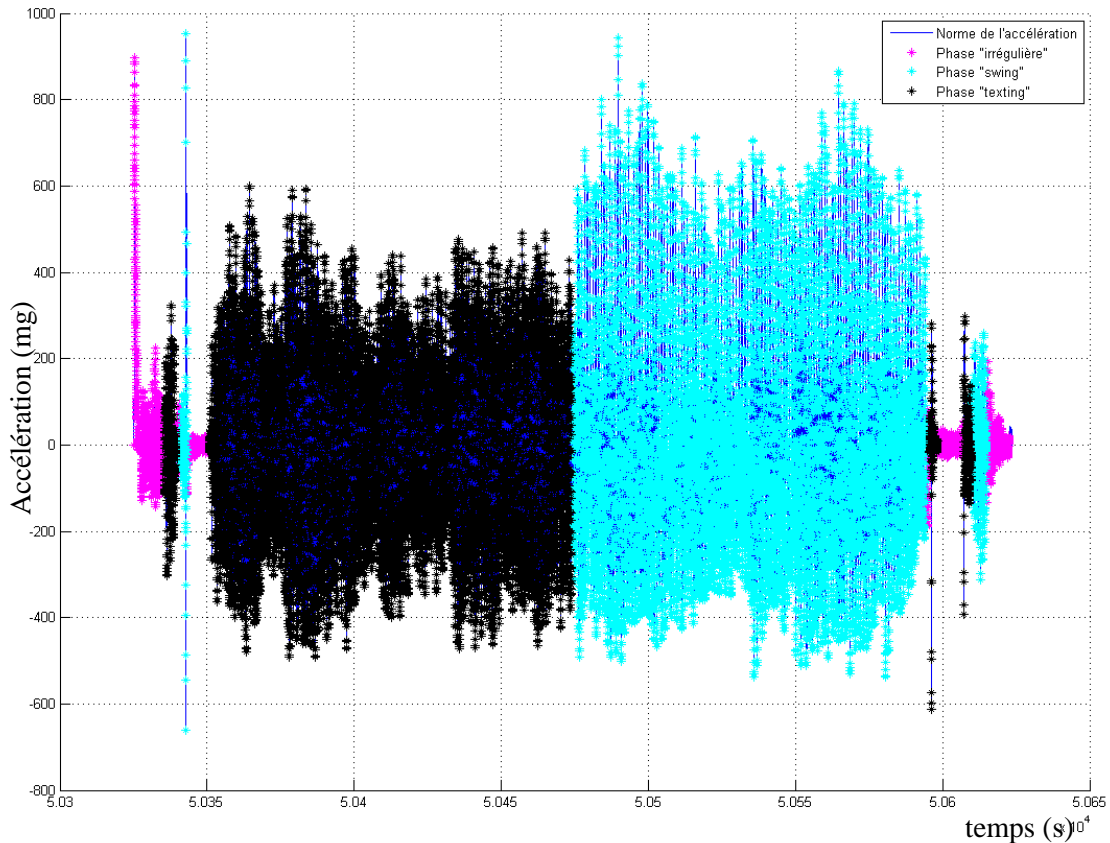


Figure 4.9 : Application des algorithmes de détection de pas sur un jeu de données iPhone 4

Sans modification des seuils pour la classification, les différentes phases sont correctement détectées. Les algorithmes existants de détection de pas calculent la norme de l'accélération et retirent la valeur moyenne. Cela a pour effet de supprimer la dérive du bruit de mesure et ainsi de ne pas être affecté par les bruits de mesures.

En comparant le nombre de pas détectés sur une même période avec la centrale inertielle de l'iPhone 4 et l'ADIS, on n'observe pas de différence.

La précision des centrales inertielles intégrées dans les « smartphones » semble donc suffisante pour les aspects inertiels. La détection de pas est donc possible avec les dispositifs existants.



## 5. Comparaison des deux stratégies de couplage

Les résultats obtenus avec les deux approches de couplages sont récapitulés sur la Figure 5.1, ils permettent de comparer les paramètres universels et les deux séries de paramètres issus du couplage lâche et serré.

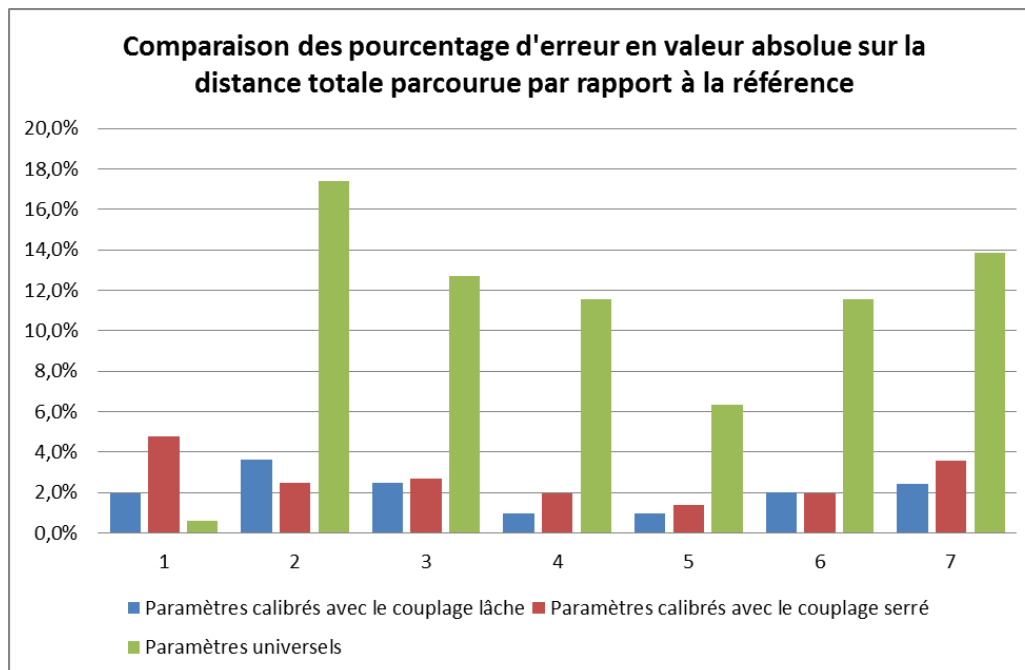


Figure 5.1 : Comparaison des erreurs sur la longueur totale parcourue

Au vu des critères d'évaluation de la performance du couplage, on peut noter tout d'abord une nette amélioration sur la détermination de la composante « longueur de pas » de la navigation à l'estime.

Les paramètres déterminés avec le couplage lâche et le couplage serré offrent des résultats sur la longueur de pas totale similaires. Cependant, il ne faut pas occulter les points suivants :

- Les positions intégrées au filtre en couplage lâche ont fait l'objet d'un post-traitement en différentiels (les positions absolues ne donnant pas des résultats satisfaisants). Les mesures Doppler sont directement intégrées et le filtre en couplage serré peut donc fonctionner en temps réel.
- Des traitements améliorant la robustesse du filtre en couplage serré n'ont pas pu être développés par manque de temps lors du stage. Ces traitements permettraient d'obtenir de meilleurs résultats.
- Les tests ont été réalisés dans un environnement dégagé, on a vu que les mesures de pseudo-distance étaient davantage affectées par les multi-trajets que les mesures Doppler. Cela constitue un avantage pour l'approche en couplage serré qui peut en outre fonctionner avec moins de mesures.

En conclusion, l'approche en couplage serré présente des avantages significatifs en particulier par sa possibilité de fonctionner dans les environnements perturbés dans lesquels les piétons évoluent.

## 6. Conclusion

Ce travail de fin d'étude avait pour objectif de développer des méthodes pour améliorer la détermination de la longueur de pas dans le cadre de la navigation à l'estime pour piétons. Deux modèles ont été élaborés pour effectuer un couplage des données inertielles et GPS à partir de capteurs bas coûts. Ces couplages ont pour but de calibrer trois paramètres (a, b et c) qui entrent dans la relation liant la longueur de pas à la fréquence de marche.

Les hybridations envisagées permettent d'améliorer significativement la détermination de la longueur de pas par rapport à l'utilisation de paramètres universels. La calibration étant obtenue assez rapidement dans les deux approches, l'actualisation de ces paramètres pour prendre en compte les changements d'état d'un individu est possible.

La deuxième stratégie de couplage présentée, utilisant les mesures de type Doppler semble être la plus prometteuse. En effet, dans l'attente de récepteurs GNSS permettant d'obtenir un positionnement suffisamment précis, seul un post-traitement en différentiel permet d'obtenir de bons résultats dans la stratégie en couplage lâche. Les mesures Doppler peuvent, elles, être traitées directement par le filtre. Elles sont en outre davantage compatibles avec les environnements fréquentés par les piétons sujets aux masques et aux multi-trajets.

Bien qu'il puisse être amélioré par une plus grande robustesse, on peut considérer la précision obtenue sur la détermination de la longueur de pas comme suffisante pour de la navigation à l'estime. L'étape suivante est d'améliorer la détermination du cap de marche. Afin de pallier une éventuelle dérive, plusieurs méthodes devront être mises en place. L'apport de mesures GNSS pour corriger la position est envisageable. Des approches de « map-matching » peuvent également permettre de corriger la position aussi bien en intérieur qu'en extérieur. On peut par exemple détecter grâce aux mesures inertielles que l'utilisateur est en train de monter des escaliers et associer cette information à un plan d'intérieur. Un autre type de stratégie consiste à corriger la dérive des capteurs inertiels. Le magnétomètre peut ainsi fournir une correction sur les mesures de vitesse angulaire fournies par le gyromètre [3].

Une fois que ces derniers points seront développés, la navigation à l'estime pour les piétons constituera une solution de navigation précise, autonome et fonctionnant aussi bien en intérieur qu'en extérieur. Les capteurs inertiels présents à ce jour dans les « smartphones » semblent suffisamment précis pour la détection de pas. Les récepteurs GNSS utilisés aujourd'hui dans ces téléphones présentent néanmoins des insuffisances pour ces méthodes. La faible fréquence d'acquisition et l'absence de mesures de phase sont des obstacles qui pourront être levés avec les prochaines générations de récepteurs et d'antennes.

De nombreuses applications sont envisageables à terme avec cette solution. L'IFSTTAR étudie les déplacements des piétons notamment à l'aide de caméras, la navigation à l'estime utilisant des dispositifs largement répandus pourra être une alternative à ce système. Encourager la pratique de la marche pour répondre à la nécessité d'une mobilité douce<sup>3</sup> est aussi un objectif de ce système. Enfin il pourra renforcer la sécurité des personnes à mobilité réduite<sup>4</sup>, les personnes malvoyantes pourront par exemple recevoir des informations sur leur environnement dictées par leur « smartphone ».

---

<sup>3</sup> On entend par « mobilité douce » toute forme de mobilité non motorisée.

<sup>4</sup> Personnes handicapées et personnes « en situation de handicap », c'est-à-dire gênées du fait de l'environnement de leurs déplacements.

Sur le plan professionnel, ce travail de fin d'étude fut très enrichissant. Le fait que le domaine d'étude soit récent et innovant a été particulièrement intéressant. Il m'a permis de travailler avec une certaine autonomie et d'acquérir des connaissances concernant les capteurs inertiels, le positionnement par satellite et la programmation. Il m'a également permis de découvrir le fonctionnement d'un laboratoire de recherche.

## Table des figures

Figure 1.1 : Illustration du fonctionnement de la navigation à l'estime piétonne (sans échelle) .....	8
Figure 2.1 : Exemple de répétition du signal lors de la marche .....	10
Figure 2.2 : Exemple d'extrapolation à partir des positions GPS et des instants de pas .....	15
Figure 2.3 : Schéma récapitulatif du fonctionnement du couplage lâche.....	17
Figure 2.4 : Schéma récapitulatif du fonctionnement du couplage serré .....	22
Figure 3.1 : Récepteur et antenne ublox utilisés.....	24
Figure 3.2 : Vue aérienne de la zone d'essai (Google Maps).....	26
Figure 3.3 : Photographie du dispositif expérimental .....	26
Figure 4.1 : Schéma explicatif : solutions multiples .....	29
Figure 4.2 : Comparaison entre les longueurs de pas de référence et celle obtenues en positionnement absolu .....	30
Figure 4.3 : Longueurs de pas obtenues avec post-traitement des mesures du u-blox.....	32
Figure 4.4 : Évolution des paramètres durant le filtre en couplage lâche .....	33
Figure 4.5 : Schématisation des principales étapes du script du couplage serré .....	35
Figure 4.6 : Utilisation du filtre en tant que solution de navigation.....	36
Figure 4.7 : Évolution des paramètres du modèle de marche sur trois tours de piste (2 en « texting » et un en « swing »).....	37
Figure 4.8 : Trajectoire obtenue avec les paramètres du modèle de pas issus de la calibration .....	38
Figure 4.9 : Application des algorithmes de détection de pas sur un jeu de données iPhone 4 .....	39
Figure 5.1 : Comparaison des erreurs sur la longueur totale parcourue .....	40

## Table des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques techniques de la centrale utilisée (ADIS 16362).....	23
Tableau 2 : Caractéristiques de la centrale inertielle d'un iPhone 4 .....	24
Tableau 3 : Résultats du couplage lâche (positionnement absolu).....	31
Tableau 4 : Tableau récapitulatif du couplage lâche, comparaison avec la référence et l'utilisation de paramètres universels .....	32
Tableau 5 : Tableau récapitulatif du couplage serré, comparaison avec la référence et l'utilisation de paramètres universels .....	38

## Références

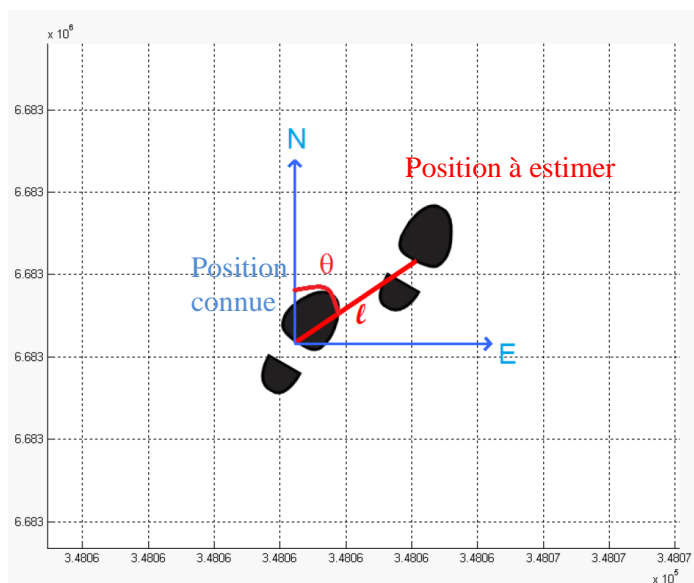
- [1] Y. Chen and H. Kobayashi, "Signal strength based indoor geolocation," in Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC '02), vol. 1, pp. 436–439, New York, NY, USA, April–May 2002.
- [2] V. Renaudin, "Hybridation MEMS/UWB pour la navigation pédestre intra-muros", Thèse, 2009.
- [3] M. H. Afzal, V. Renaudin, and G. Lachapelle, "System and method for gyroscope error estimation," US Patent 2012/0256572, PCT WO 2012/135960, October 2012.
- [4] Rose, J and J. G. Gamble (2006) Human walking, Troisième édition, Lippincott Williams and Wilkins, Baltimore.
- [5] V. Renaudin, M. Susi, and G. Lachapelle, "Step Length Estimation Using Handheld Inertial Sensors," Sensors, vol. 12, pp. 8507-8525, 2012.
- [6] Skog, I.; Handel, P.; Nilsson, J.-O.; Rantakokko, J., "Zero-Velocity Detection—An Algorithm Evaluation," Biomedical Engineering, IEEE Transactions on , vol.57, no.11, pp.2657,2666, Nov. 2010 doi: 10.1109/TBME.2010.
- [7] Kaplan, E, "Understanding GPS", Deuxième édition, chapitre 9.2
- [8] D. Borio, N. Sokolova and G. Lachapelle, "Doppler Measurement Accuracy in Standard and High-Sensitivity GNSS Receivers", IET Radar, Sonar and Navigation, Volume 5, Issue 6, July 2011, pp. 657-665
- [9] Binghao Li, Jiahuang Zhang, Peter Mumford et Andrew G. Dempster, "How good is Assisted GPS?", IGNSS Symposium 2011.

## Résumé

La géolocalisation des piétons est un sujet de recherche récent et aucune solution globale n'est actuellement disponible. On trouve des solutions fonctionnant en extérieur telles que le positionnement par satellites mais celles-ci sont peu adaptées aux piétons qui se déplacent dans des environnements où les signaux GNSS sont dégradés (présence de masques et de multi-trajets). Les solutions fonctionnant en intérieur reposent sur une trilatération à partir d'antennes émettrices placées en des points connus, les ondes Wi-fi (Wireless-Fidelity) sont communément utilisées pour ces applications. Le piéton sera géolocalisé à partir de l'information de puissance de signal reçu de la part les différents points d'accès. Ces techniques nécessitent des investissements pour avoir une couverture suffisamment dense. Elles posent aussi la question de la confidentialité des déplacements étant donné que ces informations peuvent être stockées sur des serveurs.

La solution étudiée repose sur la technique de navigation à l'estime. Cette technique déduit le positionnement de l'utilisateur à partir d'une position antérieure et d'informations de distance et de direction. Elle utilise les mesures inertielles de capteurs que l'on peut retrouver dans les « smartphones » actuels pour suivre les déplacements du piéton. Elle fonctionne donc aussi bien en intérieur qu'en extérieur et est autonome. Des recherches ont été effectuées sur le suivi des piétons par des capteurs inertiels rigidement fixé à l'usage (au pied ou à la ceinture) mais on s'intéresse ici à des capteurs pouvant être tenu en main comme c'est le cas d'un téléphone. Cette généralisation complique les traitements car il faut exclure les informations n'ayant pas de relation directe avec la marche (mouvement du bras par exemple). L'utilisation de capteurs dits « bas coût » complique également la tâche car les mesures ne peuvent être directement intégrées comme c'est le cas pour de la navigation à l'estime appliquée au déplacement d'un avion. Des traitements basés entre autres sur la reconnaissance de motifs sur les signaux enregistrés par les accéléromètres et les gyromètres sont nécessaires.

Un algorithme récemment développé permet d'extraire des mesures inertielles des informations relatives à la marche. Il permet en effet de déterminer les instants de pas et la fréquence de marche du piéton. Cet algorithme de détection de pas constitue un outil indispensable à la navigation à l'estime.



Appliquée au déplacement des piétons, la navigation à l'estime consiste à déterminer une information de longueur de pas ( $l$ ) et une information de cap ( $\theta$ ). Le travail effectué se concentre uniquement sur la

composante longueur de pas. Actuellement, cette longueur de pas est déterminée par le modèle de pas suivant :

$$s = h(a*f+b)+c$$

où :

- s est la longueur du pas (en mètres) ;
- h est la taille de l'individu (m) ;
- f est la fréquence de marche fournie par l'algorithme de détection de pas ;
- $K=\{a,b,c\}$  est un jeu de paramètres universel déterminés à partir de résultats expérimentaux.

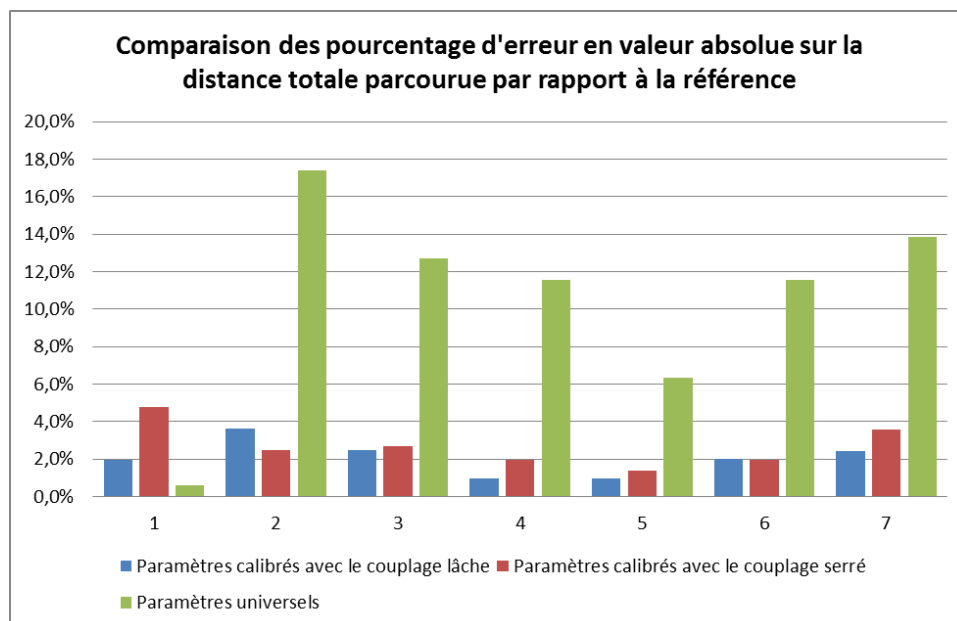
Le but de ce travail est d'améliorer la détermination de la longueur de pas en calibrant K pour chaque individu. Des études ont montré que les paramètres peuvent varier selon l'état physique (fatigue, blessure...) de l'utilisateur, la calibration sera donc répétée à plusieurs reprises.

Pour la calibration, le choix se porte sur l'utilisation de mesures GNSS (Global Navigation Satellite System). Deux approches de couplage entre les mesures inertielles et GNSS ont été développées via l'implémentation de deux filtres de Kalman. Un premier couplage utilise des positions obtenues par GPS et le deuxième utilise des mesures Doppler à partir de la constellation GPS également. Les mesures Doppler ont pour avantage d'être moins affectées par les multi-trajets surtout lorsque la vitesse de déplacement du mobile est faible comme c'est le cas pour le piéton.

Les modèles de couplage ont été testés via une phase expérimentale. Sept jeux de données ont été constitués. Pour la collecte de ces jeux de données, il était demandé aux testeurs de marcher avec une centrale inertielle et un récepteur GPS tenu en main. Une antenne de type géodésique était positionnée sur une casquette portée par le testeur, cet équipement permet de fournir une référence qui sera confrontée aux résultats obtenus à partir des capteurs tenus en main.

Plusieurs critères sont retenus pour évaluer les jeux de paramètres K issus des deux couplages :

- l'erreur sur la distance parcourue (somme des longueurs de pas obtenues avec les paramètres calibrés) par rapport à la distance parcourue de référence ;
- le temps nécessaire à la calibration : temps nécessaire pour une convergence des paramètres ;
- la compatibilité avec une application temps réel.



Les couplages réalisés permettent d'obtenir des paramètres fournissant une longueur de pas beaucoup plus proche de la longueur de référence et suffisamment précises pour la navigation à l'estime. Les améliorations sont similaires entre les deux couplages. Le premier critère est donc validé pour les deux



couplages. La convergence est d'environ 30 secondes pour le couplage lâche ainsi que pour le couplage serré. Cette durée de convergence est compatible avec les applications envisagées avec une phase de calibration effectuée avant l'entrée dans un bâtiment.

Le couplage serré utilise les mesures Doppler qui ne nécessitent pas de traitement au contraire des positions utilisées pour le couplage lâche. Les positions absolues ne permettant pas d'obtenir une convergence, des positions post-traitées en différentiel ont dû être utilisées. Le couplage lâche nécessite donc une amélioration de la précision du positionnement en temps réel.

Les dispositifs utilisés pour les essais expérimentaux sont à peu près identiques à ceux présents dans les « smartphones », cependant l'accessibilité et la fréquence des mesures GPS présente des insuffisances. Les composants évoluant rapidement, il est possible que les couplages présentés puissent être implémentés dans les « smartphones » prochainement.

La détermination du cap de marche nécessite encore de la recherche et constitue le dernier frein à la mise en place de cette solution de navigation. Cette solution permettra une géolocalisation précise et sera adaptée aux environnements fréquentés par les piétons.

# Résumé

La navigation à l'estime est une technique prometteuse pour la géolocalisation des piétons. Utilisant les mesures inertielles de capteurs tenus en main (présents dans un « smartphone »), elle fonctionne aussi bien en intérieur qu'en extérieur et est parfaitement autonome. Elle consiste en la détermination de deux composantes : le cap de marche et la longueur du pas estimés. L'objet de ce travail est d'améliorer la précision sur la détermination de la longueur de pas. Pour cela, les paramètres d'un modèle de pas liant la fréquence de marche et la taille de l'individu à la longueur du pas sont calibrés pour chaque individu.

Deux approches de couplage des mesures inertielles et GPS sont présentées dans ce mémoire : un couplage lâche utilise des positions GPS et un couplage serré est basé sur des mesures Doppler, connues pour être moins affectée par les multi-trajets lorsque la vitesse de déplacement est faible. L'erreur sur la distance parcourue est significativement réduite avec l'usage des paramètres personnalisés par rapport à l'utilisation de paramètres universels.

**Mots clefs :** Navigation à l'estime, longueur de pas, couplage, centrale inertielle, GPS.

# Abstract

Dead reckoning is a promising technique for pedestrian geolocation. It uses inertial measurement of handheld sensors (present in smartphones), it works as well for indoor and outdoor cases and it is autonomous. It consists of determining two components: estimated walking direction and step length. The aim of this work is to improve the step length determination. For that purpose, parameters of a model that combine stride frequency, user's height and step length are calibrated for each person.

Two approaches of coupling between inertial and GPS measurements are proposed: a loosely coupling using GPS position and a tightly coupling based on Doppler measurement, known for being less sensitive to multipath especially for slow movement. The error on the travelled distance is significantly reduced using personal parameters in comparison of the use of universal parameters.

**Keywords:** Dead reckoning, step length, coupling, inertial measurement unit, GPS.