

Couplage de mesures GNSS et inertielles pour de la navigation pédestre dans les bâtiments

■ Sylvain CHABLE - Valérie RENAUDIN

Ce travail de fin d'étude, réalisé dans le laboratoire GEOLOC de Nantes, et dirigé par Valérie Renaudin au sein de l'institut français des sciences et technologies des transports (IFSTTAR), s'inscrit dans l'une des deux thématiques principales du laboratoire : la géolocalisation nomade pour la mobilité multimodale. Cet axe vise notamment à concevoir des algorithmes de géolocalisation pour le voyageur à pied.

■ MOTS-CLÉS

Navigation pédestre, capteurs inertielles, récepteur GPS, différence temporelle de phase, méthode strapdown, couplage

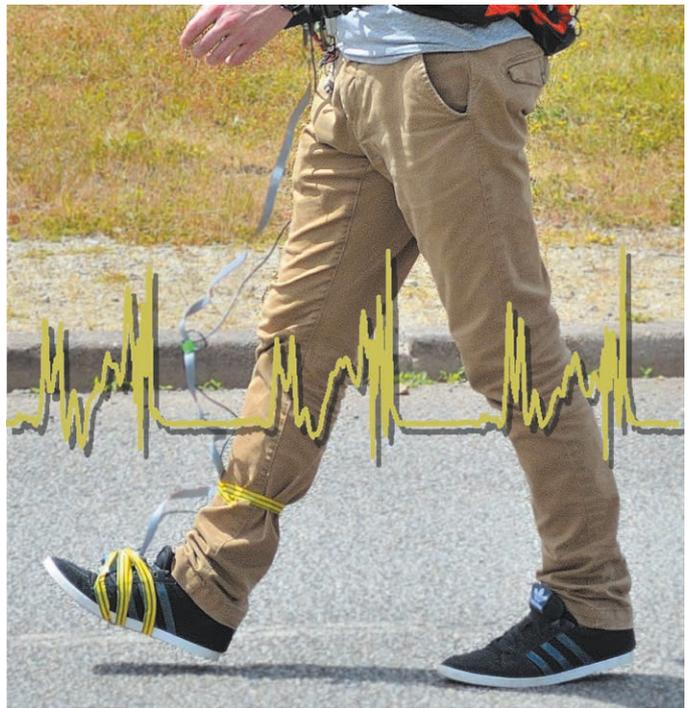
Contexte

Le positionnement des piétons diffère beaucoup de celui des véhicules routiers. Non seulement, il est difficilement prévisible, ce qui empêche d'utiliser, comme pour les véhicules, des techniques de type "Map matching" mais en plus, le piéton emprunte des chemins dans des environnements très hétérogènes et difficiles d'accès pour le positionnement par satellite.

Ce projet s'intéresse au positionnement des piétons à l'intérieur de bâtiments. Connaître sa position dans ce type d'environnement peut permettre de se déplacer et de suivre un itinéraire comme par exemple dans les musées, les aéroports ou bien les gares. La position du piéton intéresse également les acteurs du marketing, afin de cibler les clients à proximité des produits [1]. Ces applications peuvent également intéresser les domaines du secours et de la sécurité [1].

Des systèmes de navigation en intérieur existent mais leurs performances sont peu ou mal connues. Ce projet a pour finalité de calculer précisément la trace des piétons de façon autonome afin de

Figure 1. Une centrale inertielle et magnétique et un récepteur GNSS sur le pied (Source personnelle).



fournir une solution de référence pour qualifier les divers systèmes de navigation commercialisés.

Une première partie de ce projet a été réalisée en 2014 [2]. Elle a permis d'implémenter une solution de positionnement dynamique avec des capteurs inertiels situés fixement sur le pied (Figure 1). Afin de limiter la propagation des erreurs sur la position du piéton due à l'importante dérive de ce type de capteur, les caractéristiques de la marche ont été exploitées.

Cette seconde partie vise à ajouter les mesures GNSS, qui, en apportant une information de vitesse, permettront de corriger la dérive des capteurs et ainsi améliorer le positionnement du piéton en intérieur.

Rappels théoriques

Afin d'obtenir les meilleures performances possible de calcul de vitesse,

deux types d'observations GNSS ont été utilisés :

- la mesure de fréquence Doppler, qui est un décalage de fréquence entre l'onde émise par le satellite et celle reçue par le récepteur au sol. Elle apporte une information de vitesse du récepteur.
- la mesure de différence temporelle de phase ou TDCP (Time Differenced Carrier-Phase), qui donne également une information de vitesse lorsque l'on soustrait deux mesures de phases issues d'un même satellite entre deux instants.

Analyse de la vitesse calculée par GNSS

■ Relation entre les observables et la vitesse

L'équation reliant la mesure Doppler provenant du satellite i à la vitesse du

récepteur GNSS est donnée par l'équation suivante [3] :

$$f_{D_i} = -\frac{1}{\lambda} \mathbf{e}_{R_i}^{S_i} (\mathbf{v}_{S_i} - \mathbf{v}_R) + \frac{1}{\lambda} c \dot{\delta}t + \eta_{f_{D_i}} \quad (1)$$

Où :

λ : Longueur d'onde de la porteuse du signal (m)

$\mathbf{e}_{R_i}^{S_i}$: Vecteur unitaire le long de la ligne de visée (m)

\mathbf{v}_{S_i} et \mathbf{v}_R : Vitesses du satellite et du récepteur (m/s)

$c \dot{\delta}t$: Dérive d'horloge du récepteur GNSS (m/s)

$\eta_{f_{D_i}}$: Bruit thermique du récepteur GNSS (Hz).

L'équation reliant la mesure de TDCP sur le satellite i à l'instant k à la vitesse du récepteur GNSS est donnée par l'équation suivante [3] :

$$\frac{\lambda}{\Delta t} \frac{\Delta \phi_{i,k}}{\Delta t} = \frac{\Delta S - \Delta G - c \Delta dT_k + \Delta \eta_{i,k}}{\Delta t} - \mathbf{e}_{R_k}^{S_i} \mathbf{v}_R \quad (2)$$

$$\Delta S = \mathbf{e}_{R_k}^{S_i} \mathbf{x}_{S_i,k} - \mathbf{e}_{R_{k-1}}^{S_i} \mathbf{x}_{S_i,k-1} \quad (\text{m})$$

$$\Delta G = \mathbf{e}_{R_k}^{S_i} \mathbf{x}_{R_k} - \mathbf{e}_{R_{k-1}}^{S_i} \mathbf{x}_{R_{k-1}} \quad (\text{m}) \quad \text{Où :}$$

\mathbf{x}_{R_k} : Position du récepteur à l'instant k (m)

$\mathbf{x}_{S_i,k}$: Position du satellite i à l'instant k (m).

$\frac{c \Delta dT_k}{\Delta t}$: Différence temporelle de l'erreur d'horloge du récepteur GNSS à l'instant k (m/s).

$\frac{\Delta \eta_{i,k}}{\Delta t}$: Différence temporelle du bruit thermique du récepteur GNSS à l'instant k pour la mesure du satellite i (m/s).

Δt correspond à l'inverse de la fréquence d'acquisition du récepteur GNSS, ici égal à 5 Hz donc $\Delta t = 0.2$ s.

■ Évaluation théorique des erreurs sur l'estimation de la vitesse par GNSS

Certaines erreurs ont un faible impact sur la mesure Doppler et sur celle de la TDCP. C'est le cas des erreurs atmosphériques ainsi que des erreurs d'horloge des satellites. Cependant, il existe une erreur dont l'impact est difficile à observer : l'erreur de multitrajet. Intéressons-nous à l'effet de cette erreur sur la mesure Doppler. Un signal GNSS est entaché d'un multitrajet lorsque le trajet du signal, entre le satellite et le récepteur, ne se fait pas de manière directe (Figure 2).

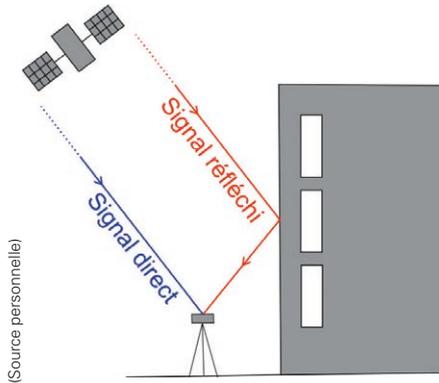


Figure 2. Signal direct et signal réfléchi.

La formule de la mesure Doppler modélise la vitesse radiale entre le satellite et le récepteur le long de la ligne de visée (1). Cette ligne dépend de l'angle d'élévation et d'azimut du satellite. Or, lorsque le signal Doppler est réfléchi, les angles d'élévation et d'azimut sont modifiés. On peut simuler ces changements d'angle par une perturbation sur ces derniers. En exprimant la formule de la mesure Doppler (1) en fonction de l'azimut α et de l'élévation β dans le référentiel de navigation, c'est-à-dire avec les vitesses exprimées selon les composantes N (North), E (East) et D (Down), on obtient la formule suivante :

$$f_{D_i} = -\frac{1}{\lambda} ((v_{S_N}^n - v_{R_N}^n) \cos \alpha \cos \beta + \dots (v_{S_E}^n - v_{R_E}^n) \sin \alpha \cos \beta + (v_{S_D}^n - v_{R_D}^n) \sin \beta) + \dots (3) \frac{1}{\lambda} c \dot{\delta}t + \eta_{f_{D_i}}$$

Maintenant, ajoutons une perturbation seulement sur l'élévation ($\delta\beta$) et analysons son effet. La formule de Taylor à l'ordre 1 est utilisée comme approximation au voisinage de l'angle d'élévation afin de simplifier les calculs :

$$\cos(\beta + \delta\beta) \approx \cos \beta - \sin \beta \cdot \delta\beta \quad (4) \sin(\beta + \delta\beta) \approx \sin \beta + \cos \beta \cdot \delta\beta$$

Après avoir intégré la perturbation à l'équation (3), la partie de la mesure q liée à la perturbation sur l'élévation est isolée :

$$q_{\delta\beta} = \frac{1}{\lambda} [(v_{S_N}^n - v_{R_N}^n) \cos \alpha \sin \beta + \dots (v_{S_E}^n - v_{R_E}^n) \sin \alpha \sin \beta + \dots (v_{S_D}^n - v_{R_D}^n) \sin \beta \cos \beta] \delta\beta \quad (5)$$

En faisant varier la perturbation sur l'angle d'élévation ($\delta\beta$) de 0 à 10°, on se rend compte de l'impact important de la perturbation, même petite, sur la mesure Doppler.

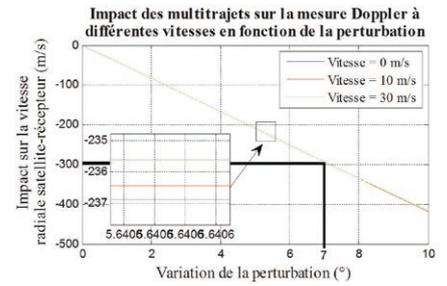


Figure 3. Simulation de l'impact d'un multitrajet sur une mesure de fréquence Doppler avec différentes vitesses du récepteur (satellite PRN5 : az=-294.3°, élé=61.5°, vN=-2160 m/s, vE=1484 m/s, vD=-913 m/s).

En effet, pour une perturbation de 7° (Figure 3), la mesure est affectée par une erreur de 300 m/s sur la vitesse radiale satellite-récepteur, soit un changement de fréquence d'environ 1 600 Hz ($\lambda f_D = v_{rad}$). En outre, on remarque que la vitesse du récepteur a très peu d'influence sur l'impact du multitrajet. Par exemple, pour une perturbation de 5.6°, l'impact est de -236.9 m/s lorsque la vitesse du récepteur est nulle et de 235.8 m/s pour une vitesse de 30 m/s.

Étant donné l'importance de l'impact des multitrajets sur la mesure Doppler, une attention particulière a été accordée à ces derniers lors de l'analyse des signaux GNSS dans le calcul de la vitesse du récepteur. Une méthode de détection et d'exclusion des mesures aberrantes (FDE : Fault Détection and Exclusion) a été implémentée afin de ne pas contaminer la solution par les multitrajets.

■ Caractérisation expérimentale de la vitesse par GNSS

Afin de déterminer la vitesse du récepteur et de caractériser les erreurs de manière expérimentale, trois expériences en statique (récepteur au sol) et deux en dynamique (récepteur dans la main) ont été réalisées dans des environnements différents (dégagé, urbain et indoor) à partir de la mesure Doppler puis à partir de la mesure de TDCP.

Le matériel utilisé pour l'étude pratique est un récepteur GNSS Ublox ANN-MS de type HSGPS (High Sensitivity GPS). Situé dans la gamme bas-coût, ce récepteur mono-fréquence observe seulement la constellation GPS ($f = 5$ Hz).



(Source personnelle)



Figure 4. Dispositif expérimental. Une centrale inertielle et magnétique et un récepteur GNSS dans la main. Un récepteur GNSS géodésique avec antenne sur la tête qui fournit la vitesse de référence calculée en mode différentiel.

Dans la première approche d'analyse de la vitesse estimée par mesures GNSS, la méthode des moindres carrés est utilisée à chaque instant. Quatre inconnues doivent être estimées : 3 inconnues pour le vecteur vitesse et une inconnue liée à l'erreur d'horloge du récepteur. Afin d'optimiser le calcul de la vitesse par GNSS, un modèle de variance inversement proportionnel au SNR (*Signal to Noise Ratio*), et adapté aux erreurs de mesures de l'appareil [4] a été créé (Figure 5) pour pondérer chacune des observables.

Le calcul de la vitesse par GNSS en mode statique a permis d'analyser simplement les performances des deux observables sur des périodes de 5 à 10 minutes. En effet, dans cette

situation, la vitesse de référence est la vitesse nulle.

En environnement dégagé, aucun multitrajet n'est observé. Les erreurs moyennes sur les vitesses calculées (moyenne des vitesses sur la durée de l'acquisition) avec la fréquence Doppler et la mesure TDCP sont chacune de l'ordre du centimètre (Tableau 1). La notion d'erreur moyenne est intéressante du point de vue physique mais ne permet pas, dans notre cas, de

comparer les deux types d'observations GNSS étant donné leur similarité. En revanche, l'analyse des écarts types (ou SD : *standard deviation*), pour chacune des observables sur la durée d'acquisition, montre que le calcul de la vitesse avec la mesure TDCP (écart type moyen suivant les 3 composantes de 0.070 m/s) est 2 à 3 fois meilleur (Tableau 1) que celui fait avec la mesure Doppler (écart type moyen de 0.200 m/s).

Concernant l'expérimentation en environnement urbain, où l'on doit faire face aux masques et multitrajets, les vitesses atteignent 10 m/s ! L'application du FDE supprime les mesures entachées de multitrajets et apporte des résultats du même ordre de grandeur que ceux de l'expérimentation précédente (Figure 6).

De nouveau, la mesure TDCP offre de meilleures performances dans le calcul de vitesse (écarts-types 3 à 4 fois plus faible).

Les résultats du calcul de vitesse en environnement intérieur sont décevants. Les quelques signaux reçus, dont les SNR sont très faibles (< 20 dB), sont entachés de multitrajets et varient forte-

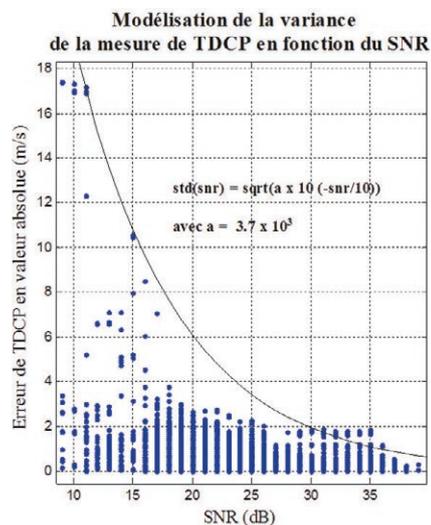


Figure 5. Modèle de pondération des mesures de TDCP.

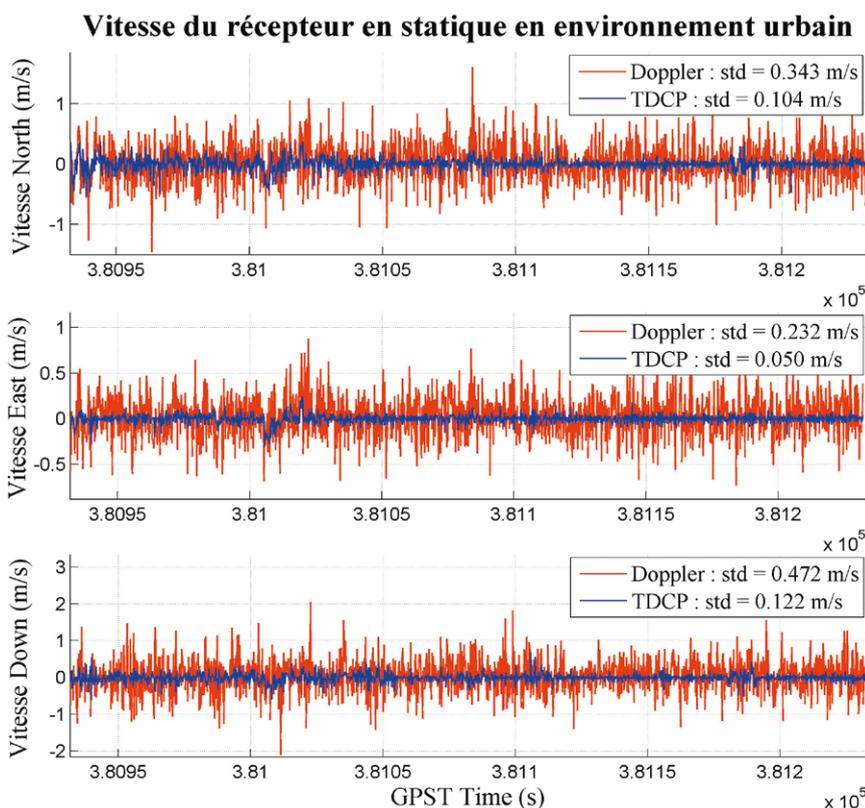


Figure 6. Vitesse du récepteur, calculée en mode statique, en milieu urbain, par mesures de fréquence Doppler et TDCP.

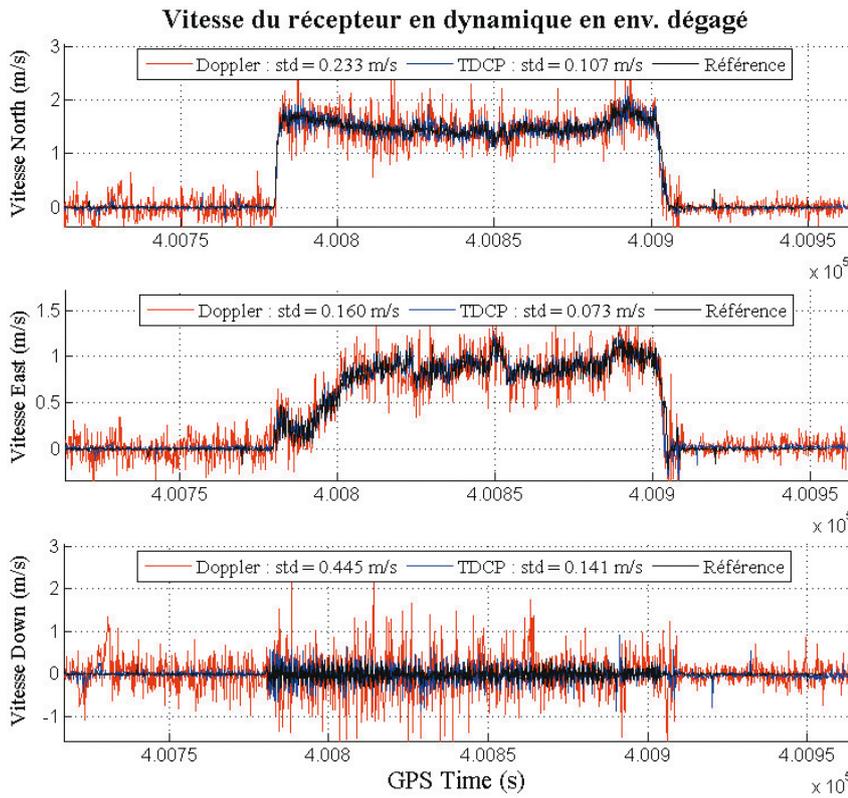


Figure 7. Vitesse du récepteur, calculée en mode dynamique, en milieu dégagé, par mesures de fréquence Doppler et TDCP.

qu’avec la mesure Doppler. Par conséquent, c’est la mesure de TDCP qui est exploitée par la suite dans le système de navigation hybride INS/GNSS.

Système de navigation hybride INS/GNSS sur le pied

Le filtre de positionnement dynamique existant utilise seulement les observations des capteurs inertiels (gyromètre et accéléromètre) et magnétique de type MEMS [2]. La mécanisation du filtre est de type “strapdown”. Elle consiste à utiliser les observations de la centrale inertielle pour calculer directement par double intégration la position et par simple intégration la vitesse du pied selon les équations de Newton. De plus, les angles d’attitudes, représentant la matrice de rotation entre le repère “body” (celui de la centrale inertielle) et le repère de navigation (celui de la carte locale), sont obtenus par intégration des observations du gyromètre.

Afin de limiter la propagation des erreurs sur la position du piéton due à l’importante dérive de ce type de capteur et à la mécanisation du filtre, plusieurs corrections liées au mécanisme de la marche (ZUPT : Zero velocity UPdaTe), au champ magnétique (QSF : Quasi Static Field) et à la variation de l’accélération (QSA : Quasi

ment dès l’entrée dans le bâtiment. Ils sont rejetés par le filtrage FDE et donc non exploités dans les calculs.

Le calcul de la vitesse par GNSS a également été effectué en situation dynamique (dégagé et urbain) pour analyser le comportement du calcul de la vitesse en mouvement.

La vitesse de référence est obtenue en effectuant la différence temporelle des positions calculées par le récepteur GNSS géodésique en mode différentiel (en noir : Figure 7). La différence entre la vitesse de référence et celle calculée par le récepteur GNSS à chaque instant donne l’erreur sur la vitesse. Comme lors de l’acquisition en mode statique, l’analyse des erreurs moyennes et écarts-types sur l’erreur de vitesse calculée en mode dynamique montre que la mesure de TDCP offre de meilleures performances comparée aux mesures de fréquences Doppler (1.5 à 3 fois meilleurs : tableau 1). Par exemple en environnement dégagé (Figure 7), l’erreur moyenne est du même ordre de grandeur, mais l’écart type de l’erreur de vitesse avec la mesure TDCP suivant la composante Nord (0.107 m/s)

est environ 2 fois moins élevé que celui avec la mesure Doppler (0.233 m/s).

En conclusion, pour ce type de récepteur GNSS, la mesure de TDCP est l’observable donnant les meilleures performances pour le calcul de la vitesse. Les résultats avec la TDCP sont globalement 2 à 3 fois meilleurs

Dynamique du système	Type d’environnement		Fréq. Doppler (m/s)		Mesure TDCP (m/s)		SD_Doppler / SD_TDCP
			SD	Emoy	SD	Emoy	
Statique	Dégagé	N	0.189	0.020	0.066	0.021	2.9
		E	0.133	0.007	0.048	0.010	2.8
		D	0.268	0.021	0.109	0.017	2.5
	Urbain	N	0.343	0.007	0.104	-0.003	3.3
		E	0.232	0.007	0.050	-0.003	4.6
		D	0.472	0.009	0.122	-0.010	3.9
Intérieur		∞		∞			
Dynamique	Dégagé	N	0.234	0.004	0.107	0.007	2.2
		E	0.159	-0.005	0.073	-0.007	2.2
		D	0.459	0.008	0.141	0.012	3.3
	Urbain	N	0.482	0.103	0.333	0.074	1.4*
		E	0.452	-0.003	0.294	0.008	1.5*
		D	0.863	-0.118	0.663	-0.079	1.3*

Tableau 1. Bilan du calcul de vitesse avec la mesure de fréquence Doppler et différence de phases (TDCP).

*La position mesurée en différentiel (GNSS), servant à calculer la vitesse de référence, est flottante (ambiguïtés non fixées).



Static Acceleration) ont été implémentées [2,7]. L'objectif de la suite du travail est d'intégrer la correction TDCP dans le filtre de Kalman étendu existant et de tester son influence sur la qualité du positionnement en environnement intramuros.

■ Filtre de positionnement dynamique

Le vecteur d'état est composé de 6 paramètres.

$$\mathbf{X}^T = \left(\mathbf{q}_b^{nT} \quad \mathbf{b}_{g_a}^T \quad \mathbf{b}_a^{bT} \quad \mathbf{p}^{nT} \quad \mathbf{v}^{nT} \quad c \frac{\Delta dT^T}{\Delta t} \right) \quad (6)$$

\mathbf{q}_b^n : Quaternion des angles d'attitude du repère body par rapport au repère de navigation

\mathbf{b}_{g_a} : Biais du quaternion du gyromètre

\mathbf{b}_a^b : Biais de l'accéléromètre dans le repère body

\mathbf{p}^n : Position du pied dans le repère de navigation

\mathbf{v}^n : Vitesse du pied dans le repère de navigation

Les données angulaires (rotations, mesures gyrométriques et biais du gyromètre) sont exprimées sous la forme de quaternions. L'utilisation de ces derniers permet de s'affranchir des problèmes de singularités lors du passage entre les matrices de rotation et les angles d'Euler [7].

Les modèles d'évolution des paramètres sont [2] :

$$\mathbf{q}_b^n(t+dt) = \mathbf{q}_b^n(t) \otimes \mathbf{q}_\omega(t) \quad (7)$$

$$\mathbf{p}^n(t+dt) = \mathbf{p}^n(t) + \mathbf{v}^n(t)dt + \frac{1}{2} \mathbf{a}^n(t)dt^2 \quad (8)$$

$$\mathbf{v}^n(t+dt) = \mathbf{v}^n(t) + \mathbf{a}^n(t)dt \quad (9)$$

Où :

\mathbf{q}_ω : Quaternion du gyromètre.

\mathbf{a}^n : Accélération dans le repère de navigation.

Les évolutions des biais du quaternion du gyromètre, celui de l'accéléromètre et la différence temporelle de l'erreur d'horloge du récepteur sont modélisés par des marches aléatoires [7]. La matrice de mesure de la correction TDCP, qui lie le vecteur d'état à la mesure TDCP, est déduite de l'équation de modélisation de la mesure de TDCP (2) [8]. Elle corrige directement la vitesse et par corrélation tous les autres paramètres.

■ Analyse expérimentale

L'expérimentation commence par une phase en environnement dégagé (Figure 8), faisant un aller-retour du Nord vers le Sud avec trois phases statiques : au début, au milieu et à la fin. Ensuite celle-ci se poursuit en environnement intérieur (Figure 9) avec un tour dans les couloirs d'un bâtiment, une sortie du bâtiment puis une nouvelle entrée dans le bâtiment avec un tour dans les couloirs et enfin une dernière sortie.

Le trajet total correspond à environ 1 km de marche avec la centrale inertielle et magnétique fixée au pied.

Un récepteur GNSS couplé avec une station de base et dont l'antenne est située sur la tête du piéton fournit la trajectoire de référence (en vert sur la Figure 8).

En environnement dégagé (Figure 8), beaucoup d'observations GNSS sont disponibles et on observe qualitativement l'apport bénéfique de la correction TDCP sur le cap. Sur l'aller, la dérive de la position est réduite par deux. En effet, durant la phase statique entre l'aller et le retour, l'erreur en position est d'environ 10 m sans la correction TDCP et de 5 m avec celle-ci. Sur le retour (vers le Sud), la position avec la correction TDCP se dégrade. Cependant l'erreur en position avec la correction TDCP, comparée à celle sans, reste inférieure d'environ 6 m au moment de la dernière phase statique. L'erreur planimétrique avec la correction TDCP atteint tout de même 20 mètres au bout de 12 minutes et 26 mètres sans la correction TDCP.

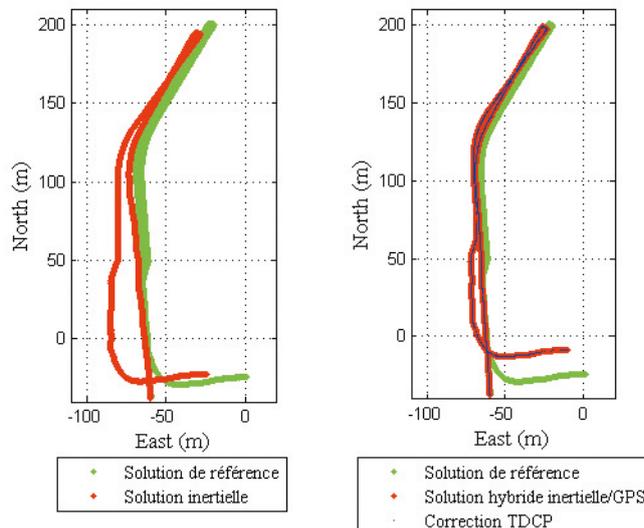


Figure 8. Trajectoires calculées en environnement dégagé avec (à droite) et sans (à gauche) la correction TDCP.

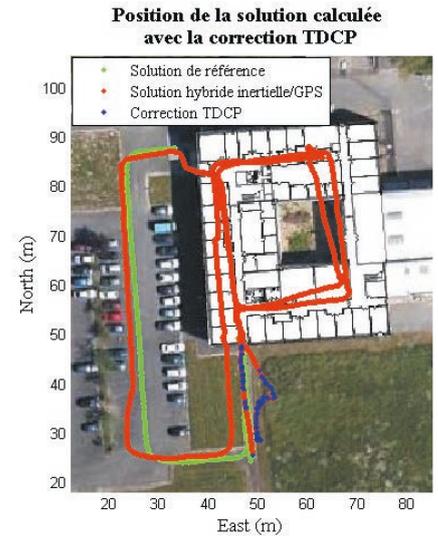


Figure 9. Position de la solution calculée en environnement intérieur avec et sans la correction TDCP (Source IFSTTAR).

Du point de vue qualitatif, les positions calculées avec et sans la correction TDCP sont très proches en environnement indoor. Cependant, en étudiant les écarts en position en extérieur, on constate que la position calculée avec la correction TDCP est plus proche de la référence d'environ 40 cm que la position calculée sans cette correction. On note aussi que des observations GNSS biaisées ont été exploitées à l'intérieur (Figure 9) perturbant la solution. Au niveau quantitatif, les densités de probabilité de l'erreur planimétrique, dans les cas où la correction TDCP est utilisée (en bleu : Figure 10) et où elle n'est pas utilisée (en rouge), illustrent bien l'apport significatif de la correction TDCP. En effet, environ 50 % des erreurs sont inférieures à 4 m dans le

Densité de probabilité de l'erreur planimétrique avec et sans la correction de TDCP

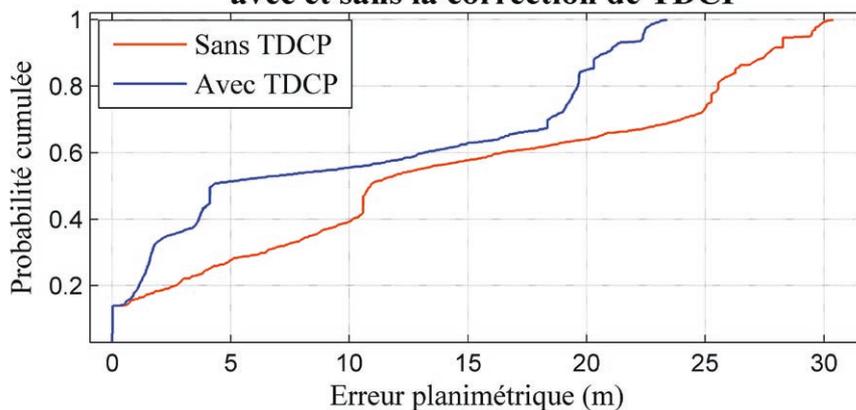


Figure 10. Densité de probabilité de l'erreur planimétrique.



cas où la correction TDCP est appliquée, c'est seulement 25 % des données qui le sont dans le cas où elle n'est pas appliquée, soit deux fois moins. De plus, les erreurs atteignent jusqu'à 31 m sans la correction TDCP et seulement 23 m avec la correction, ce qui représente une diminution de l'erreur maximale de 26 %.

Globalement, les corrections issues de la mesure de phase GNSS (TDCP) réduisent la dérive en position grâce à une meilleure estimation de la vitesse, mais également des biais accélérométriques et gyrométriques [8]. Les larges erreurs planimétriques encore observées encouragent à rechercher de nouvelles pistes d'amélioration.

Conclusion et perspectives

Dans un premier temps, une étude théorique a montré l'important impact des multitrajets sur la qualité des observations GNSS. Des outils ont été exploités pour les détecter et les supprimer. Dans un second temps, l'analyse du calcul de vitesse par signaux GNSS a permis de comparer les performances de précision et de fiabilité basées sur deux mesures : fréquence Doppler et différence de phase (TDCP). Offrant les meilleures performances, c'est la mesure de TDCP qui fut retenue. Enfin, dans un troisième temps, un filtre de positionnement dynamique INS/GNSS, qui intègre la vitesse GNSS, a été conçu. Des fortes corrections sur la vitesse ont été observées grâce au filtre. Elles ont permis de limiter la dérive de la posi-

tion au cours du temps et de corriger par corrélation les biais accélérométriques et gyrométriques. Cependant, à ce stade des travaux, aucune mesure GNSS n'a pu être exploitée en intérieur. En conclusion, l'apport de la mesure de TDCP est significatif surtout en extérieur pour estimer les erreurs des capteurs inertiels avant de pénétrer dedans.

Notons qu'une approximation importante est effectuée actuellement dans le filtre. En effet, la correction TDCP apporte une information sur la vitesse moyennée sur 0.2 s (fréquence d'acquisition du GNSS : 5 Hz). Or la vitesse est calculée dans le filtre à une fréquence de 100 Hz. Donc une des perspectives principales est d'intégrer dans le vecteur d'état la vitesse moyennée afin que la correction TDCP puisse être appliquée directement sur ce paramètre. La seconde perspective est de continuer les acquisitions en intérieur afin d'exploiter les mesures GNSS pour que des corrections puissent s'effectuer également en intérieur. ●

Remerciements

Je remercie vivement Valérie Renaudin, directrice du laboratoire GEOLoc et maître de stage, Jérôme Verdun, professeur référent à l'ESGT et Christophe Combettes, doctorant à GEOLoc, pour la bonne réalisation de ce travail.

Contacts

Sylvain CHABLE sylvain.chable@orange.fr
Valérie RENAUDIN valerie.renaudin@ifsttar.fr

Bibliographie

- [1] : Larousserie, D. (2013). *Naviguer dans les murs*. Consulté le 22/08/2015, sur Le Monde, <http://www.lemonde.fr>.
- [2] : Marchand, C. (2014). *Evaluation d'une solution de référence autonome pour de la navigation pédestre dans les bâtiments*. Projet Master: INSA Strasbourg.
- [3] : Veilleux, J.-P. (2006). *Détermination précises des vitesses et des accélérations d'un athlète par mesures GPS à hautes fréquences*. Thèse de Master: UNIVERSITÉ LAVAL, QUÉBEC.
- [4] : Groves, P. D. (2013). *Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation system second edition*.
- [5] : Durand, S. (2014). *Cours de topométrie de précision 2^e année ESGT*.
- [6] : Hartinger, B. (1999). *Variances of GPS Phase Observations : The SIGMA Model*. GPS Solutions, 35-43.
- [7] : Renaudin Valérie, Combettes Christophe (2014). *Magnetic, Acceleration Fields and Gyroscope Quaternion (MAGYQ)-Based Attitude Estimation with Smartphone Sensors for Indoor Pedestrian Navigation*. Sensors.
- [8] : Chable, S. (2015). *Couplage de mesures GPS et inertielles pour de la navigation pédestre dans les bâtiments*. Projet Master: ESGT Le Mans.

ABSTRACT

Developing a precise estimation system of pedestrian tracks inside buildings in order to qualify others navigation methods is targeted in this project. The aim of this contribution is to improve the existing solution thanks to novel GNSS observations. GNSS based velocity estimate was studied using two different observations: Doppler frequency and Time-Differenced Carrier-Phase (TDCP). Following a performance comparison of the velocity estimated with both observables, the TDCP was chosen for the hybridization filter. The contribution of GNSS TDCP is found to be significant on the existing solution. Achieving a better biases estimate improves the overall quality of pedestrian foot tracks estimation.