

# CAPTEURS ET ANALYSE DE SIGNAUX POUR LA NAVIGATION PÉDESTRE

Moix S., Steiner C., Ladetto Q., Merminod B.

contact : [quentin.ladetto@epfl.ch](mailto:quentin.ladetto@epfl.ch)

www : <http://topo.epfl.ch>

*Cet article présente une approche pour améliorer la détermination de l'azimut d'un système de navigation pédestre. Le système étudié combine un gyroscope, un compas magnétique et un accéléromètre tri-axial. Lorsque le compas est perturbé, l'azimut du gyroscope prend la relève et lorsque l'azimut du gyroscope dérive, le compas permet de le recalibrer. Deux façons de mettre à jour les paramètres du système sont présentées. Comme le système de mesure est fixe par rapport au corps, la détection de chaque mouvement est nécessaire afin de passer de l'azimut mesuré à l'azimut de déplacement. Pour ce faire, les motifs accélérométriques tri-axiaux concernant les différents types de pas sont considérés. Les résultats montrent que le système intégré améliore la fiabilité et la précision de la trajectoire. L'approche développée permet d'obtenir des positions avec une erreur régulièrement inférieure à 5% de la distance parcourue.*

## Introduction

Après les domaines maritimes et aériens, le concept de navigation s'applique de plus en plus à la circulation routière. Les systèmes d'aide à la conduite et à la gestion du trafic se généralisent. Une demande croissante dans la localisation de personnes voit le jour. Les pompiers, les soldats, les secouristes ou les personnes aveugles sont des utilisateurs potentiels d'un système de navigation pédestre. La mise à jour de systèmes d'information à référence spatiale, le sport et la recherche médicale sont autant de domaines nécessitant une telle technologie.

La dynamique de mouvement d'une personne étant plus complexe que celle d'un véhicule, la prédiction de la vitesse, de la distance parcourue et de la direction d'un piéton s'en trouvent modifiées. Une antenne GPS ne pouvant assurer une réception en tout lieu, il est nécessaire d'utiliser d'autres capteurs pour combler les informations manquantes. C'est ce que l'on appelle la navigation à l'estime. Cette localisation nécessite, entre autres, de détecter et reconnaître, en temps réel, chaque pas effectué par une personne quelconque. On distingue les pas avant, arrière, à gauche et à droite. La détection des pas latéraux est importante chez les personnes aveugles, vu que c'est ainsi qu'ils évitent un obstacle.

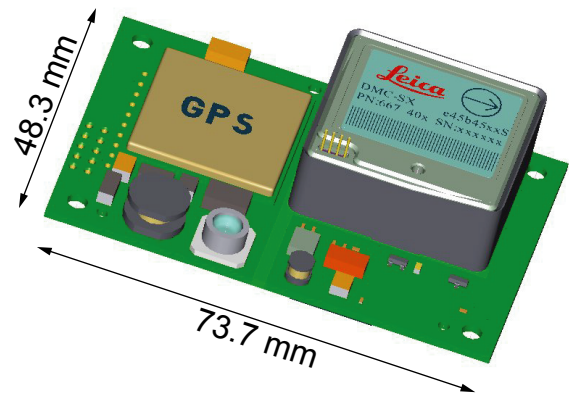


FIG. 1 – *Pedestrian Navigation Module (PNM) produit par Leica Vectronix en étroite collaboration avec le laboratoire de Topométrie (EPFL). Un système de localisation tridimensionnelle complet pour moins de 50 grammes.*

## Système de localisation utilisé

La précision désirée inférieure à 5% de la distance parcourue détermine les moyens à mettre en œuvre. Le choix des capteurs dépend également des inconvénients qui leur sont imputables. La taille, le poids, la consommation énergétique ainsi que le coût sont directement supportés par l'utilisateur. Le PNM (Pedestrian Navigation Module) est un produit de Leica Vectronix réalisé en étroite collaboration avec le laboratoire de Topométrie (EPFL), FIGURE 1. Il comprend trois senseurs magnétiques, trois accéléromètres, un baromètre ainsi qu'un récepteur GPS. La fréquence d'acquisition des données est modulable jusqu'à 60 Hz. La position du système, relativement libre sur le tronc de l'utilisateur, n'est pas verticale. Son inclinaison est déterminée sur la base des données accélérométriques. Dans un environnement urbain, le signal du compas est affecté par des perturbations magnétiques. L'utilisation d'un gyroscope permet de s'affranchir de ces perturbations. Le compas est également affecté d'un biais et d'un facteur d'échelle changeant à chaque enclenchement du capteur. Une procédure de calibrage du compas les détermine en début de parcours. Les paramètres du gyroscope vertical considérés sont les suivants.

- un facteur d'échelle considéré comme unitaire

après détermination de l'inclinaison du capteur;

- un biais de la vitesse angulaire [ $^{\circ}/s$ ];
- une dérive du biais fluctuant entre [ $^{\circ}/s^2$ ].

Le biais et sa dérive imposent une mise à jour continue de l'azimut. Deux façons différentes de mettre à jour les paramètres sont décrites par la suite.

## Morphologie des pas

Un pas avant est défini par une succession de mouvements. En appui sur les deux jambes, une d'elles est lancée vers l'avant, le talon de cette jambe touche le sol, le poids du corps est déplacé sur le nouveau point d'appui et le pied au sol se déroule jusqu'aux orteils. C'est alors au tour de l'autre jambe. Lors d'un tel cycle de marche, on observe donc en alternance une phase d'appui sur une jambe, puis un balancement et une phase d'appui sur les deux jambes. Le centre de gravité est

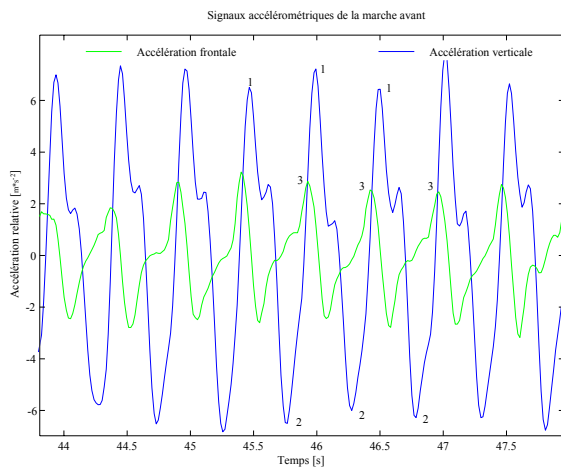


FIG. 2 – Les signaux accélérométriques des pas avant par rapport à l'axe de la marche (Ladetto, 2002).

au plus haut lorsque la personne est en appui sur les 2 jambes (1) et s'abaisse lors du balancement (2), avant d'être accéléré vers l'avant (3). Les variations du centre de gravité induisent les accélérations frontales et verticales de la FIGURE 2. Les signaux accélérométriques pour les pas arrière sont semblables à ceux des pas avant. Par contre, pour les pas latéraux, deux élévations successives du centre de gravité ne donnent lieu qu'à une enjambée, comme on le remarque à la FIGURE 3. Une fois en double appui (1), le cycle correspond à étendre une jambe latéralement, ce qui provoque une accélération dans le même sens (2) tout en baissant le corps, puis à poser le pied (3), ce qui fait remonter le centre de gravité (4) jusqu'au double appui. Aucun pas n'étant jamais effectué de la même manière, sa variation en amplitude et dans le temps est toujours différente. Il est donc nécessaire de déterminer des caractéristiques universelles, quelles que soient ces variations, mais suffisamment distinctes pour reconnaître chaque type de pas.

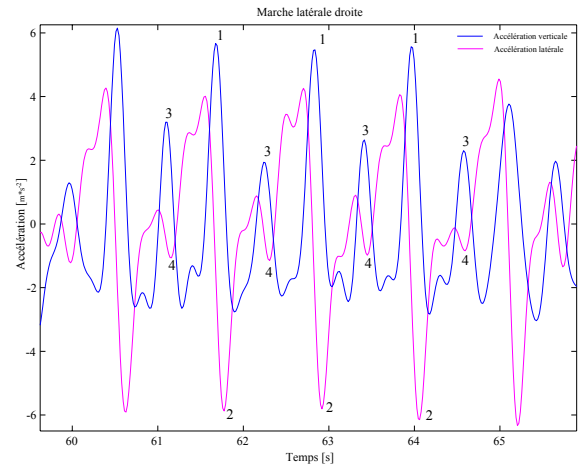


FIG. 3 – Les signaux accélérométriques des pas à droite par rapport à l'axe de la marche (Ladetto, 2002).

## Algorithmes développés

Comme trois accéléromètres orthogonaux sont utilisés, un même pas se retrouve sur les 3 axes. Cependant, un pas en avant ou en arrière a une accélération plus importante sur l'axe frontal. De même, un pas à gauche ou à droite est plus marqué sur le signal latéral. Il s'ensuit que la reconnaissance des pas est effectuée, en premier lieu, séparément sur les axes frontaux et latéraux. Sur chacun des signaux un pas est défini comme étant les variations accélérométriques entre 2 minima successifs. On décale donc légèrement le motif par rapport à sa définition sur l'axe vertical pour mieux le détecter.

## Le pré-traitement

Afin d'éliminer les bruits relatifs du capteur par rapport au corps, les signaux sont d'abord filtrés. La fréquence d'échantillonnage est de 30 Hz, mais on choisit une fréquence de 4Hz pour détecter les pas. C'est une fréquence qui englobe de justesse les informations du système, mais qui a l'avantage de lisser suffisamment le signal de manière à simplifier les traitements suivants. Le choix s'est porté sur un filtre de Butterworth d'ordre 3. Par la suite, on ne considère que les signaux filtrés, d'autant plus qu'ils sont décalés des 4 coefficients du filtre, ce qui empêcherait une comparaison précise et cohérente avec un signal brut. Une deuxième étape consiste à détecter chaque début de pas déterminé par un minimum sur les signaux frontaux et latéraux. En ce qui concerne les pas frontaux, on profite de la correspondance du signal vertical pour créer une fenêtre dans laquelle rechercher un minimum dès lors absolu. Le signal vertical oscillant à chaque pas autour de sa moyenne, les limites de la fenêtre se situent aux deux valeurs moyennes, la première sur une pente positive, la deuxième sur la pente négative suivante. Entre-deux, on retrouve systématiquement deux

maxima du signal frontal, entre lesquels on détermine enfin l’instant relatif au début du pas. A tous les pas clairement détectés, s’ajoutent quelques erreurs dues au bruit résiduel qu’il s’agit d’éliminer dans un traitement ultérieur. Lors de pas latéraux, par contre, le signal vertical n’est pas suffisamment clair pour être utilisé. On est obligé de déterminer une longueur de fenêtre a priori. Cette détermination ne crée pas d’inconvénients majeurs puisque le nombre d’échantillons d’un pas latéral est relativement constant. La fenêtre alors déterminée glisse le long du signal, échantillon par échantillon, et seul un minimum situé en son centre est détecté comme étant le début d’un pas.

## La reconnaissance des pas

Une fois séparés des pas latéraux, les pas avant et arrière sont reconnus au travers d’une autre comparaison avec le signal vertical. Le maximum d’un pas avant précède juste celui du signal vertical correspondant, alors qu’un pas arrière a son maximum après. Cette observation suffit à distinguer ces 2 types de pas quel que soit le sujet. En ce qui concerne les pas latéraux, la méthode la plus robuste se base sur la comparaison des pentes moyennes entre les extrémités du pas et son maximum. Si la première pente est supérieure à la seconde en valeur absolue, c’est un pas à gauche. Dans le cas contraire, les algorithmes reconnaissent un mouvement vers la droite.

A ce stade, tous les pas ont été reconnus, mais séparément sur les signaux frontaux et latéraux. Comme certains mouvements peuvent induire une variation importante d’amplitude sur les 2 axes à la fois, il n’est pas à exclure qu’un même pas soit détecté à double. Afin d’éliminer de telles ambiguïtés, on applique un test temporel supplémentaire.

Pour le signal frontal, on calcule la densité d’aire, à savoir, l’aire à l’intérieur du triangle formé par un pas divisée par le nombre d’échantillons de sa base. Elle est nettement plus importante pour un mouvement clairement effectué dans cet axe que pour un motif à éliminer. Un tel seuil dépend cependant en partie de l’amplitude générale de chaque pas. Quelques facteurs sont donc ajustés afin que cette distinction ressorte mieux en tout temps. Le traitement de l’axe latéral est plus compliqué, vu que la méthode de la densité d’aire ne fournit pas de bons résultats. Il est donc nécessaire de procéder à une comparaison de l’amplitude des signaux frontaux et verticaux pour chacun des pas. Cette étape permet d’éliminer de nombreuses erreurs initiales de détection. Quelques pas encore négligeables sont cependant toujours présents. La procédure alors utilisée dépend de la forme particulière de ces pas. Ils ont trois lobes, dont le deuxième, assez centré, est le plus élevé. Ainsi, la recherche de la position du maximum par rapport aux extrémités de chaque pas permet de distinguer un pas à garder (son maximum se situe proche d’une extrémité)

d’un pas à éliminer. Il reste à regrouper les pas frontaux et latéraux qui subsistent selon leur ordre chronologique.

Finalement, quelques corrections sur les pas déjà détectés sont ajoutées. Cette étape a lieu à la fin, pour avoir une vision globale des derniers mouvements. Ces algorithmes devant agir en temps réel, on ne peut imposer un retard de plus de 3-4 pas. Il s’agit de contrôler la bonne détection de chaque début de motif. Au cas où un pas semble dégénéré, il est facile de vérifier s’il correspond au début ou à la fin d’un de ses voisins. De plus, si un pas est reconnu comme d’un autre type que ses deux voisins précédents ou suivants, une procédure de vérification est appliquée. Vu que la plupart des erreurs de reconnaissance proviennent d’une mauvaise délimitation du pas, un contrôle par rapport au maximum de ce dernier est effectué. Une correction n’étant utile que pour les pas frontaux, on emploie la méthode des pentes développée pour les pas latéraux. Généralement, les deux méthodes conduisent à des erreurs dans des situations différentes et la probabilité de pouvoir corriger un pas mal reconnu est très forte.

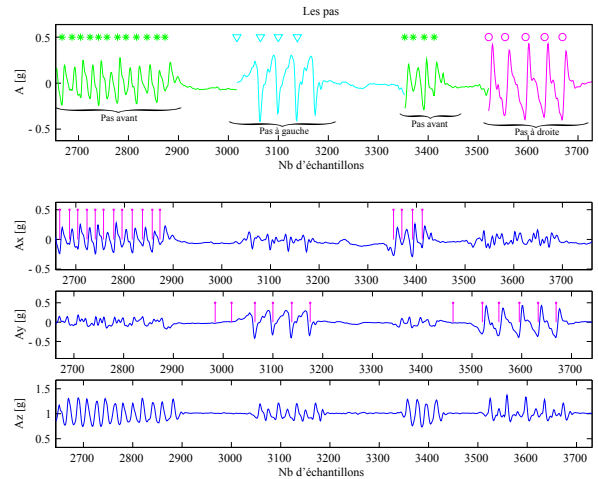


FIG. 4 – Détection automatique du type de pas à partir du signal accélérométrique tri-axial.

## Détection des perturbations

La détection des perturbations devant se réaliser fidèlement en temps réel, plusieurs tests successifs sont nécessaires. Si la valeur de la norme du champ magnétique mesurée est anormale, on considère le signal comme perturbé. Un écart-type de la norme du champ est calculé sur une fenêtre mobile. Un seuil est défini pour déterminer la présence d’une perturbation. Le même principe est appliqué à la norme planimétrique du champ. Il permet de détecter des perturbations directionnelles. Un seuil est également établi pour la comparaison des deux azimuts à disposition. Ce seuil évolue dans le temps afin de tenir compte de la dérive

du biais du gyroscope. Les perturbations sont encore décelées par comparaison des dérivées numériques des deux azimuts. La FIGURE 5 illustre l'effet des perturba-

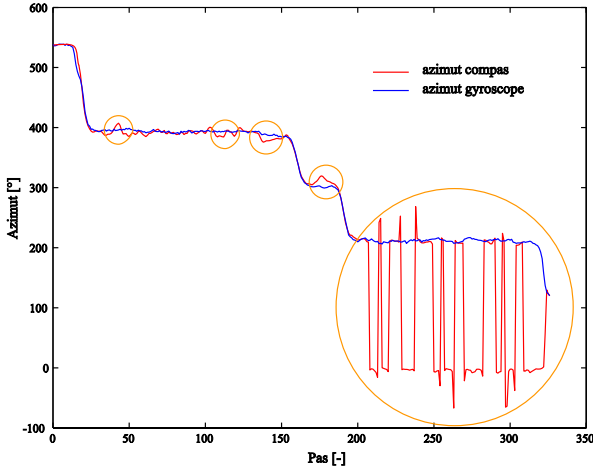


FIG. 5 – Détection de perturbations magnétiques.

tions sur l'azimut du compas. Ce test est réalisé sur un parking. De faibles perturbations n'ont que peu d'effet sur l'azimut du compas. On le voit en début du trajet. Les fortes perturbations dues à la proximité des moteurs des voitures conduisent à une dérive importante de l'azimut en fin de parcours.

## Recalage du système avec un filtre à corrélation exponentielle

Le parcours de calibrage du compas permet de calculer le biais de départ du gyroscope et son erreur moyenne. Les paramètres à mettre à jour sont le biais et l'azimut du gyroscope (Gabaglio, 2002). Le biais est obtenu par modélisation des mesures du gyroscope. L'azimut est fourni par le compas et mécanisé en continu à partir des mesures du gyroscope. Les paramètres sont compensés périodiquement lorsque la précision de l'azimut du gyroscope se dégrade au-delà d'un seuil fixé. La correction moyenne du biais (Levet, 2001) entre deux mises à jour (intervalle  $[j; j+1]$ ) s'écrit :

$$\overline{\Delta b}_{j+1} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=j}^{j+1} \Delta b_i = \frac{\varphi_{j+1}^{gyro} - \varphi_{j+1}^{compas}}{\Delta T}$$

avec  $\Delta T = n \cdot \Delta t = t_{j+1} - t_j$ , le temps écoulé entre deux mises à jour.  $\Delta t$  étant le pas de temps entre deux mesures et  $\Delta b_i$  le biais instantané du gyroscope. Le biais recalé au même temps de mise à jour est :

$$b_{j+1} = b_j + \overline{\Delta b}_{j+1}$$

Le biais calculé lors d'une mise à jour est proche du biais précédent puisque sa dérive est faible. On prend note de ce constat en appliquant une corrélation exponentielle du biais dans le temps. En prenant en compte

cette corrélation, le biais devient :

$$b_{j+1}^* = (1 - \alpha) \cdot b_{j+1} + \alpha \cdot b_j^*$$

où  $\alpha$  est le paramètre du filtre exponentiel. Si  $\alpha$  vaut 1, le filtre ignore la nouvelle mesure et considère la modélisation comme parfaite. Si  $\alpha$  égale 0, aucun filtrage n'est réalisé. La correction apportée à l'azimut du gyroscope  $\Delta \varphi_{j+1}^{gyro*}$  est :

$$\Delta \varphi_{j+1}^{gyro*} = \varphi_{j+1}^{gyro*} - \varphi_{j+1}^{gyro} = (1 - \alpha) \cdot \Delta T \cdot \overline{\Delta b}_{j+1}$$

$\Delta$	< tolérance	> tolérance
< erreur gyro	Azimut = fct1(compas+gyro)	Perturbation magnétique  Azimut = gyro  <b>Pas de mise à jour</b> du biais du gyroscope
> erreur gyro	<b>Mise à jour</b> du biais du gyroscope  Azimut = fct2(compas+gyro)	Azimut = fct3(compas+gyro)

FIG. 6 – Différents traitements réalisés en fonction de la valeur du seuil d'erreur du gyroscope et de la différence entre la variation d'azimut du compas et de celui du gyroscope.

La propagation d'erreur permet de calculer l'évolution de l'erreur moyenne de l'azimut du gyroscope. Si celle-ci dépasse le seuil de tolérance, et qu'aucune perturbation n'est détectée à cet instant, la mise à jour se réalise selon la FIGURE 6.

## Recalage du système avec un filtre de Kalman

Les paramètres sont les mêmes qu'au point précédent. Ici, le biais est modélisé par un processus markovien. Le filtre de Kalman est bien adapté à l'estimation de paramètres variables dans le temps puisqu'il combine un modèle de compensation paramétrique classique (modèle d'observation) et un modèle de mouvement qui décrit l'évolution temporelle des paramètres (Merminod, 1989). Concrètement on travaille avec les accroissements des paramètres. Le filtre prend en compte les nouvelles observations issues du compas et les anciennes compensations des paramètres pour estimer les corrections à apporter aux paramètres lors des mises à jour. Il comporte un modèle stochastique des

observations. Le filtre exponentiel et le filtre de Kalman présentent des résultats similaires. La différence essentielle est un gain constant sur les paramètres compensés pour le modèle exponentiel, alors que pour le modèle de Kalman, le gain évolue en fonction de la qualité de la prédiction. De nombreux essais ont montré des résultats similaires pour les deux approches. Considérant la robustesse du filtrage exponentiel, celui-ci sera retenu par la suite.

## Résultats

Dans la grande majorité des cas, le type de pas est reconnu correctement, FIGURE 4. Pour les pas avant, quelle que soit la direction de marche ou même le type de terrain, la fiabilité approche les 100%. Les rares erreurs proviennent de pas peu marqués, lors de changements de direction ou en s'arrêtant. Lors de tels mouvements, les motifs ont des amplitudes faibles et sont moins typiques.

L'exemple présenté à la FIGURE 7 illustre le parcours d'un piéton (environ 260 m) sur un parking. Il s'agit d'un trajet en boucle comprenant deux lignes droites de 100 m. Les perturbations dues aux voitures sont importantes.

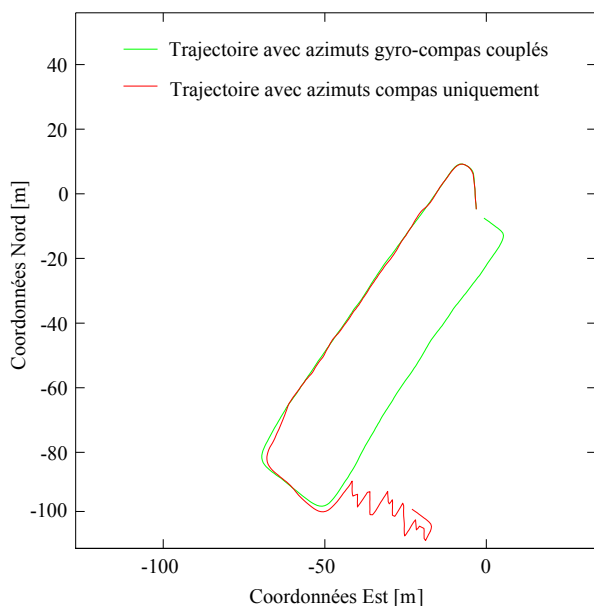


FIG. 7 – Comparaison des trajectoires obtenues en milieu magnétiquement perturbé. Le gyroscope prend la relève dès que l'azimut du compas n'est plus fiable.

La trajectoire du compas aboutit à 136 m de la réalité, celle issue de l'azimut couplé à 3.6 m. De faibles perturbations dégradent la mesure du compas sur la première ligne droite. La trajectoire du compas est faiblement affectée. Sur la deuxième ligne droite, le passage proche de l'avant des voitures crée de fortes perturbations. La trajectoire du compas est alors inacceptable. Le gain résultant de l'intégration des deux cap-

teurs est considérable.

## Conclusions

Les recherches présentées proposent une approche pour le traitement et l'intégration des mesures issues de capteurs inertiels et d'un compas magnétique pour un système de navigation pédestre. Aucune mesure GPS n'est prise en compte dans ce travail. Deux algorithmes de filtrage ont été comparés pour intégrer les mesures du compas et du gyroscope. Le filtre avec corrélation exponentielle du biais et le filtre de Kalman présentent des résultats satisfaisants et très similaires. Pour sa simplicité, la préférence est donnée au filtrage avec corrélation exponentielle du biais. Simultanément, l'identification des pas avant, arrière, à gauche et à droite permet une correction de l'azimut mesuré en azimut de déplacement. L'avantage des développements réalisés favorise une navigation fiable en tout temps et dans toute situation. La précision des positions absolues fournies par le PNM, une fois calibré, est inférieure à 5% de la distance parcourue et cela sans faire appel au système GPS.

## Remerciements

Cette recherche s'inscrit dans le cadre d'une collaboration avec Leica Vectronix, soutenue par la Commission pour la Technique et l'Innovation (CTI) du gouvernement suisse.

## Références

- Gabaglio, V. (2002). *GPS/INS System Integration for Low-Dynamic Application*. PhD thesis, Ecole Polytechnique Fédérale Lausanne (EPFL). in prep.
- Ladetto, Q. (2002). *Capteurs et algorithmes pour la localisation autonome en mode pédestre*. PhD thesis, Ecole Polytechnique Fédérale Lausanne (EPFL). in prep.
- Levet, Y. (2001). *Combinaison de capteurs gps et inertiels pour la navigation pédestre*. Masters Thesis, EPFL.
- Merminod, B. (1989). *The use of kalman filters in gps navigation*. M. Surv., University of New South Wales: Sydney.