

# CAPTEURS ET ALGORITHMES POUR LA LOCALISATION AUTONOME EN MODE PÉDESTRE

THÈSE N° 2710 (2002)

PRÉSENTÉE À LA FACULTÉ ENVIRONNEMENT NATUREL, ARCHITECTURAL ET CONSTRUIT

SECTION DES SCIENCES ET DE L'INGÉNIERIE DE L'ENVIRONNEMENT

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

PAR

**Quentin LADETTO**

ingénieur en génie rural diplômé EPF  
de nationalité suisse et originaire de Grimisuat (VS)

acceptée sur proposition du jury:

Prof. B. Merminod, directeur de thèse

Prof. H. Bleuler, rapporteur

Prof. P.-A. Farine, rapporteur

Dr S. Gnepf, rapporteur

Prof. G. Lachapelle, rapporteur

Lausanne, EPFL  
2003



A Leonardo

*I limiti esistono soltanto nell'anima di chi è a corto di sogni.*

Philippe Petit



# Remerciements

Une thèse de doctorat est avant tout une grande aventure de plusieurs années durant lesquelles on côtoie de nombreux acteurs, dont certains dans divers épisodes plus ou moins rocambolesques. Il me serait bien impossible, faute de place, de mentionner toutes les personnes ayant contribué, consciemment ou non, aux options retenues durant ce travail de recherche. Anonyme, ne crois pas que tu es personne!

Après quelques péripéties préliminaires, l'histoire commença à l'endroit dit «El Peruano», petit restaurant péruvien typique du quartier nord de Santafé de Bogotá, Colombie. Réunis après une journée de travail avec MM. **Stefano Ghielmetti** et **Gregorio Graf**, c'est là que s'échafaudèrent les premiers contacts avec le groupe Defense and Special Project (DSP), actuellement Vectronix AG, de Leica Geosystems AG.

Grâce à la confiance et les excellentes conditions professionnelles rencontrées dans le groupe du Prof. **Bertrand Merminod**, directeur de cette recherche, une collaboration officielle s'établit rapidement entre le DSP et l'unité de Topométrie.

Un séjour prolongé dans le team du Prof. **Klaus-Peter Schwarz** à l'Université de Calgary (Canada) permit de judicieux développements. Les nombreuses discussions avec le Dr. **Alexander M. Bruton**, devant un barbecue ou une Guinness, ont également joué un rôle non négligeable dans l'avancement des travaux. Les résultats fort prometteurs furent la cause de fréquents périples aux USA en compagnie de M. **Josephus van Seeters**, assisté scientifiquement à distance depuis le siège central, Heerbrugg, par le Dr. **Silvio Gnepf**.

Le retour à Lausanne marqua le début de longues balades dominicales avec M. **Vincent Gabaglio**, compagnon de labeur et néanmoins ami. Les principales illustrations retenues pour la majorité des conférences sont le résultats de ces escapades sensoriques. Les tests physiologiques nécessitant la participation de nombreux sujets, une grande variété d'individus a transité dans notre bureau sous l'oeil amusé du Dr. **Jan Skaloud**, spécialiste incontestable (et incontesté) des systèmes inertiels ainsi que des «renversés». Parallèlement, plus de 250 km furent parcourus en Virginie par **Mme et M. Jean et Jack Runyon** permettant l'amélioration et validation de différents modèles.

La valorisation d'une invention nécessite ruse et artifices. Afin de pallier à un manque d'expérience et à une naïveté certaine, MM. **Max Grillmayr** et **Gabriel Clerc** mirent à notre service leur savoir-faire en matière de contrats et de négociations, établissant de fait des «win-win situations» entre tous les partis concernés. Afin de fêter un brevet ou tout simplement à la recherche d'inspiration, rien de tel qu'une visite à **M<sup>me</sup> Maria Soares** et **M<sup>me</sup> Vera Da Silva**. Que serait la Géomatique sans la proximité de (ou d'un) SAT!

Inspiré de Napoléon Bonaparte selon qui *un bon croquis vaut mieux qu'un long discours*, les illustrations ainsi que la mise en page du présent document doivent beaucoup aux astuces et conseils de M. **Jean-Robert Gros** secondé par  $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$ , fidèle compagnon du doctorant.

Pour terminer, j'aimerais remercier du fond du coeur ma soeur, **Coline** et mon père, **Aldo**, pour leur soutien moral et encouragements tout au long de ce travail. Vos conseils, remarques, humour, et interminables discussions ont permis à plusieurs reprises de dissiper quelques incertitudes et doutes.

Cara **Cristina**, insieme a te ho vissuto questa tesis dal (quasi) principio fino al (fin) fin. Grazie per tutta la tua comprensione e per farmi scoprire il meraviglioso mestiere di padre ...

Mais ceci est une autre aventure!



# Résumé

Connaître sa position de façon précise et fiable, en tout temps, avec et sans réception de signaux satellitaires, représente une problématique passablement explorée pour la navigation de véhicules. Élargir ce service aux piétons nécessite une approche différente, adaptée à la dynamique, à la vitesse et surtout à la totale liberté de mouvement que favorise la marche à pied. La mécanisation classique consistant en une double intégration de l'accélération jointe à une intégration de la vitesse angulaire pour obtenir une position n'est malheureusement pas judicieuse pour des systèmes bon marché. La raison principale est que la vitesse de déplacement d'une personne se trouve noyée dans la plage de bruit du capteur. Afin de tenir compte de toutes ces spécificités, une approche événementielle, remplaçant celle mentionnée ci-dessus et dite temporelle, fut développée. Celle-ci fait appel à diverses technologies ainsi qu'à une approche physiologique et biomécanique de la marche, scindant cette recherche en trois parties principales.

La première étape consiste en la détermination des principaux paramètres physiologiques utiles à la quantification de la vitesse et de la taille des pas. Si l'agitation des signaux accélérométriques se veut un bon indicateur de la vitesse, la fréquence des pas améliore la robustesse du modèle. L'influence du genre de la personne s'additionnant à la grande diversité humaine, une normalisation des différentes relations est nécessaire. De nombreux essais réalisés dans des conditions de la vie de tous les jours montrent que la variation de la taille des pas en fonction de la pente dépend fortement de la condition physique de l'individu ainsi que de la durée de l'ascension ou de la descente. Une personne pouvant se déplacer en avant, en arrière et latéralement, les motifs caractéristiques de ces mouvements-types ont été identifiés. Les divers modèles suggérés furent testés ensuite favorablement avec des aveugles dont la marche varie fortement en fonction du niveau de confiance envers le parcours effectué.

La deuxième partie concerne directement les multiples technologies nécessaires à une localisation tri-dimensionnelle autonome. La connaissance du champ magnétique terrestre et de son orientation permet de déterminer l'azimut de déplacement de la personne. L'utilisation d'un gyroscope améliore la fiabilité du système tout en facilitant la détection et la mitigation de l'influence des perturbations magnétiques. Plus stable à court terme que le compas, celui-ci en est donc le complément idéal dans de telles circonstances. L'information altimétrique s'obtient par mesures barométriques qui, selon le degré de précision désiré, peuvent être différentielles. L'utilisation d'un récepteur GPS permet une localisation absolue ainsi que le calibrage des erreurs des divers senseurs et des modèles physiologiques.

Le troisième chapitre décrit le processus d'intégration des modèles et mesures utilisées de même que les caractéristiques et traitements spécifiques à la navigation pédestre. Une phase d'initialisation est présentée afin de déterminer les spécificités du mouvement de chacun et d'adapter ainsi individuellement les paramètres de marche. La détection du déplacement couplée à celle de la direction permet une détermination et un filtrage optimal de l'azimut ne présentant que peu ou pas de dégradation temporelle. La prise en compte de divers phénomènes propres aux déplacements des êtres humains permet à l'intelligence artificielle d'améliorer la navigation pédestre. Le couplage des diverses sources de mesures ainsi que leur précision et implication sur la fiabilité de l'information fournie sont décrits et illustrés. Plus de 550 km parcourus dans diverses circonstances avec 31 personnes différentes ont permis de valider l'approche présentée tout en fixant ses limites.



# Summary

The challenge of knowing one's position in a precise and reliable way, at any time, with and without reception of satellite signals, represents an area fairly explored for the navigation of vehicles. To widen this service to the pedestrians requires a different approach that adapts to the dynamics, to the speed and especially to the total freedom of movement of the people. The traditional approach implements a triad of accelerometers and gyroscopes, which signals are integrated to obtain the relative displacement. This concept is unfortunately not judicious for a low-cost system. The principal reason is that the speed of displacement of a person is lost in the sensor noise level. In order to take into account all these specificities, an occurrential approach was developed, based upon a subset of sensors as well as physiological and biomechanical parameters of the walk. This research is divided into three main directions.

The first area of interest consists in the determination of the physiological parameters necessary to quantify the speed of walk and the step length. While the agitation of the accelerometer signals is a good speedometer, the frequency of the steps improves the robustness of the models. The influence of the gender added to the great human diversity imply the normalisation of the various relations deduced. Many tests carried out under conditions of everyday life reveal that the variation of the stride length, especially with the slope, strongly depends on the physical training of the person as well as on the duration of the climb or descent. Characteristic pattern were identified to differentiate between the forward, backward and lateral movements. The various suggested models were then favourably tested with some blind people, whose walking rhythm strongly varies according to the degree of confidence they have towards the course.

The second part directly relates to the multiple technologies integrated to build an autonomous three-dimensional Pedestrian Navigation Module (PNM). The knowledge of the terrestrial magnetic field and its orientation makes it possible to determine the azimuth of displacement of a person. The use of a gyroscope improves the reliability of the system and facilitates the detection of magnetic disturbances. More stable in the short term than the compass, it is therefore the optimal complement under such circumstances. The altimetric information is obtained by barometric measurements which, according to the required precision, can be differential. The implementation of a GPS receiver allows the absolute positioning simultaneously to the calibration of the different sensor parameters and physiological models.

The third part describes the integration of the models and measurements as well as the characteristics and treatments specific to pedestrian navigation. An initialisation phase is presented to individualize the parameters of the walk and adapt them from the general model. Hence, thanks to the compass-gyroscope integration together with the detection of any movement, this allows an optimal determination and filtering of the azimuth that has little or no temporal degradation. The consideration of several phenomena specific to the displacements of the humans brings artificial intelligence in pedestrian navigation. The coupling of the various sources of measurements, the influence of their precision on the computed position as well as their implication on the PNM reliability are described and illustrated. More than 550 km covered in various circumstances by 31 people allowed to validate the presented approach while fixing its limits.



# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	Contexte . . . . .	2
1.2	Objectifs . . . . .	3
1.3	Méthodologie . . . . .	4
	Bibliographie . . . . .	5
<b>2</b>	<b>De la biomécanique de la marche à la quantification du déplacement</b>	<b>7</b>
2.1	Le rôle de la gravité dans la marche et l'énergie pendulaire . . . . .	7
2.1.1	La course: une marche plus rapide? . . . . .	11
2.1.2	Conclusion . . . . .	12
2.2	Modélisation de la taille des pas . . . . .	13
2.2.1	Cadre de réflexion, idée poursuivie . . . . .	13
2.2.2	Modélisation de la vitesse: une importance majeure . . . . .	15
2.2.3	L'agitation: un indicateur de la vitesse? . . . . .	15
2.2.4	La cadence: le paramètre de la vitesse par excellence . . . . .	16
2.2.5	La taille des pas en fonction de la vitesse de marche . . . . .	19
2.3	L'influence de la pente dans la marche . . . . .	20
2.4	Distributions statistiques . . . . .	21
2.5	Déplacements: 360° de liberté . . . . .	22
2.6	Personnes malvoyantes et aveugles . . . . .	24
	Bibliographie . . . . .	25
<b>3</b>	<b>Mesures et modèles</b>	<b>29</b>
3.1	Le champ magnétique terrestre . . . . .	29
3.1.1	Le vecteur magnétique terrestre . . . . .	31
3.1.2	Attitude . . . . .	32
3.1.3	Défaut d'horizontalité . . . . .	34
3.1.4	Perturbations magnétiques . . . . .	35
3.2	Senseur inertielle . . . . .	38
3.2.1	Mesure de vitesses angulaires: le gyroscope . . . . .	38
3.2.2	Erreurs internes aux gyroscopes . . . . .	39
3.3	La barométrie . . . . .	39
3.3.1	Nivellement barométrique . . . . .	40
3.3.2	Développement mathématique . . . . .	41
3.4	Le système NAVSTAR-GPS . . . . .	43
3.4.1	Système de coordonnées . . . . .	43
3.4.2	Système de hauteurs . . . . .	44
3.5	Propagation des incertitudes . . . . .	44
3.5.1	Incertitude altimétrique . . . . .	46

Bibliographie . . . . .	46
<b>4 Instrumentation et algorithmique</b>	<b>49</b>
4.1 Instrumentation . . . . .	49
4.2 Un déplacement en polygonale . . . . .	50
4.3 L'accélérométrie: des intérêts antagonistes . . . . .	53
4.3.1 Détection et direction du mouvement . . . . .	54
4.3.2 Une normalisation souhaitable? . . . . .	55
4.3.3 Identification par multiplication . . . . .	55
4.3.4 La méthode des pentes . . . . .	56
4.3.5 Plan horizontal virtuel pour la détermination de l'azimut de déplacement . . . . .	58
4.4 Procédure de calibrage . . . . .	62
4.5 L'intégration de mesures satellitaires . . . . .	65
4.6 Reproductibilité des trajectoires . . . . .	68
4.6.1 Mécanisation totale ou approche événementielle? . . . . .	69
4.7 Aspects particuliers . . . . .	70
4.8 Gestion des perturbations magnétiques . . . . .	72
4.8.1 Optimisation de l'information magnétique . . . . .	72
4.8.2 Utilisation du gyroscope . . . . .	74
4.8.3 Considérations pour la mise à jour des paramètres du gyroscope . . . . .	81
4.9 La troisième dimension: l'altitude . . . . .	87
4.10 Concept de fiabilité dans la navigation pédestre . . . . .	88
4.11 Analyse globale des résultats . . . . .	91
Bibliographie . . . . .	94
<b>5 Perspectives de recherche et conclusions</b>	<b>97</b>
5.1 Perspectives de recherche . . . . .	97
5.1.1 Amélioration du système . . . . .	98
5.1.2 Reconnaissance de motifs . . . . .	98
5.2 Conclusions . . . . .	100
Bibliographie . . . . .	102
<b>Curriculum Vitae</b>	<b>105</b>

# Table des figures

1.1	Le Labyrinthe de Crète et l'histoire de Thésée et d'Ariane . . . . .	2
2.1	Les différentes réactions du sol pour une marche avant et arrière . . . . .	9
2.2	Les différentes positions du corps entre une marche normale et une marche rapide . . . . .	9
2.3	Les différentes périodes d'un cycle de marche . . . . .	10
2.4	Rotations de la taille et des épaules durant la marche . . . . .	11
2.5	Accélération antéro-postérieure et énergie mécanique durant la marche et la course . . . . .	12
2.6	Relation entre la fréquence des pas et l'excitation du signal accélérométrique	16
2.7	Estimation de la vitesse 3D en fonction du signal accélérométrique . . . . .	17
2.8	Oscillations verticales en fonction de la vitesse de marche . . . . .	18
2.9	Détermination des différentes étapes de la marche par accélérométrie . . . . .	19
2.10	Relation linéaire entre la fréquence de pas et la vitesse normalisée . . . . .	20
2.11	Le rôle de la pente sur la fréquence de marche . . . . .	21
2.12	Évolution statistique des pas durant un parcours. . . . .	23
2.13	Motifs caractéristiques de la marche dans les 4 directions principales . . . . .	24
3.1	Description du champ magnétique terrestre . . . . .	30
3.2	Vecteur magnétique terrestre dans l'hémisphère Nord . . . . .	31
3.3	Représentation des angles d'attitude . . . . .	32
3.4	Erreur de verticalité de l'axe principal d'un théodolite . . . . .	35
3.5	Perturbations magnétiques . . . . .	36
3.6	Perturbations magnétiques douce et forte . . . . .	37
3.7	Principales erreurs input/output d'un gyroscope . . . . .	39
3.8	Relation entre la pression et l'altitude . . . . .	41
3.9	Les différents modes de mesures GPS avec leur précision indicative en position	43
3.10	Relation entre les altitudes orthométrique, ellipsoïdique et la cote du géoïde.	45
4.1	Représentation schématique du système de navigation pédestre. . . . .	51
4.2	Illustration des systèmes de navigation pédestre utilisés. . . . .	52
4.3	Représentation globale des algorithmes de navigation pédestre. . . . .	53
4.4	Différents scénarii pour la normalisation de pas avant et arrière. . . . .	55
4.5	Reconnaissance du type de pas par corrélation de modèles. . . . .	56
4.6	Reconnaissance du type de pas par la méthode des pentes. . . . .	57
4.7	Trajectoire déterminée en identifiant la direction du mouvement. . . . .	58
4.8	Illustration des 3 phases du filtre de Savitzky-Golay . . . . .	60
4.9	Comparaison entre les approches temps-réel et post-traitement dans le calcul de l'azimut. . . . .	61

4.10	Représentation des coefficient de pondération des filtres exponentiel et de Savitzky-Golay. . . . .	63
4.11	Différents scénarios concernant le calibrage avec les valeurs de roulis et tangage calculées pas à pas. . . . .	64
4.12	Optimisation et contrôle de la taille des pas. . . . .	66
4.13	Intégration de mesures satellitaires selon deux principes complémentaires. . .	67
4.14	Exemple de trajectoire obtenue avec des mises à jour effectuées lorsque GPS n'est que ponctuellement disponible. . . . .	68
4.15	Mécanisation totale vs approche événementielle. . . . .	71
4.16	Procédure particulière pour changements de direction rapide et trajectoire connue. . . . .	73
4.17	Parcours avec et sans application de procédures particulières. . . . .	74
4.18	Procédure de traitement de l'azimut lors de perturbations magnétiques. . .	75
4.19	Mise à jour du biais selon deux approches différentes et leur conséquence sur la précision de l'azimut gyroscopique. . . . .	82
4.20	Différences dans le calcul des azimuts selon la mise à jour du biais gyroscopique.	83
4.21	De l'azimut calculé à l'azimut de déplacement. . . . .	84
4.22	Intégration compas-gyroscope en milieu magnétiquement neutre . . . . .	86
4.23	Intégration compas-gyroscope en milieu magnétiquement perturbé. . . . .	87
4.24	Représentation 3D d'une descente d'escaliers à l'intérieur d'un bâtiment. . .	89
4.25	Comparaison d'altitude GPS et barométriques sur un parcours en plein air.	90
4.26	Représentation de la notion de fiabilité interne pour l'azimut de déplacement.	91
4.27	Influence du type d'antenne GPS sur la qualité de la trajectoire calculée. . .	94
4.28	Navigation urbaine à l'estime effectuée par un aveugle. . . . .	95
5.1	Cartographie interactive au service de la navigation pédestre. . . . .	99

# Liste des tableaux

2.1	Variation de la taille des pas en fonction du type de marche. . . . .	14
2.2	Comparaison des distances calculées avec les modèles de vitesse linéaire et curvilinéaire. . . . .	18
2.3	Analyse de la marche: comparaison entre la marche d'un aveugle et celle d'une personne voyante. . . . .	26
3.1	Complémentarité du gyroscope et du compas magnétique . . . . .	38
3.2	Facteurs de conversion entre les unités de pression . . . . .	40
4.1	Caractéristiques des différents capteurs utilisés. . . . .	50
4.2	Roulis et tangage virtuels causés par la dynamique de marche. . . . .	64
4.3	Comparaison de 22 trajectoires réalisées par une même personne en milieu magnétiquement non perturbé. . . . .	70
4.4	Comparaison de deux systèmes, procédures de navigation. . . . .	71
4.5	Écarts entre virages vrais et virages mesurés avec compas magnétique et gyroscope. . . . .	83
4.6	Pondération empirique des différents scenarii de calcul de l'azimut. . . . .	91
4.7	Exemple caractéristique de fiabilité fournie par le module lors de navigation à l'estime. . . . .	92
4.8	Visibilité des satellites GPS en fonction du type d'antenne utilisée. . . . .	93



# Chapitre 1

## Introduction

*«Ariane, la fille de Minos, fit venir Dédale et lui demanda de lui indiquer un moyen de sortir du labyrinthe; puis elle envoya chercher Thésée; elle lui dit qu'elle assurerait sa fuite à la condition de l'épouser. On se doute qu'il ne fit aucune difficulté pour y consentir; alors elle lui donna ce qu'elle avait reçu de Dédale, un peloton de fil qu'il devait attacher par une extrémité à l'intérieur de la porte et dérouler au fur et à mesure de son avance. Ce qu'il fit, et désormais assuré de pouvoir retourner sur ses pas, il partit hardiment à la recherche du Minotaure.»*

Ce récit mythologique se déroulant plus de 1000 ans avant notre ère et rapporté par le poète latin Ovide (43 av JC - 18 apr. JC) raconte l'une des premières astuces utilisées dans la navigation pédestre (Hamilton, 1978). Par *navigation* il faut comprendre l'action de se déplacer, que ce soit sur les mers, dans les airs ou simplement sur terre. L'écrit intégral, analysé à la lumière de la géomatique, recèle toute la problématique actuelle de la localisation. Sans indication préalable, ni plan représentatif du trajet à parcourir, l'exploration est le seul mode de déplacement possible. Les hautes parois entravant tout repère vers quelque point connu, l'individu ne pourra se fier qu'à son sens de l'orientation. Une fois parvenu à destination, le chemin du retour n'en sera que plus facile et rassurant si le parcours fut balisé de quelque manière que ce soit.

En transposant la construction crétoise à une ville actuelle, la hauteur des édifices, jointe à la complexité de certains plans urbains transforment en héros athénien toute personne étrangère à la cité arrivant à la destination désirée. Fort de la technologie actuelle, le fil salvateur peut être désormais remplacé par différents capteurs propres à la navigation. Compas magnétique, gyroscopes, accéléromètres, baromètres et récepteurs satellitaires (GPS, GLONASS, EGNOS, ...) composent le plus souvent les systèmes de mesures embarqués et permettent une localisation en temps réel du véhicule auquel ils sont rattachés. Avions, bateaux, voitures, autant de dynamiques et de problématiques avec cependant un point commun: une contrainte relativement faible quant à la taille et au poids des senseurs utilisés influençant directement la qualité choisie pour ces derniers.

Il est évident que lorsque l'on substitue le piéton au véhicule, toutes ces notions, augmentées de l'ergonomie, prennent soudainement une importance majeure. En réduisant la qualité des senseurs, de nouveaux problèmes apparaissent également. Une erreur de vitesse de quelques cm/s due à l'imprécision du signal accélérométrique n'aura pas la même importance pour un avion volant à plus de 200 m/s que pour une personne flânant à 1.2 m/s.

Pour la seconde application, la qualité des capteurs devrait donc être encore supérieure à la première afin de garantir le résultat d'une mécanisation inertielle classique. Si une telle approche est réalisable (Chatenay, 2000; Gillet et al., 2000; Soehren et Keyes, 2000), les contraintes mentionnées ci-dessus, ajoutées au coût élevé d'un tel système, en limitent les usagers ainsi que les applications.

L'étude de la biomécanique de la marche permet heureusement de résoudre cette problématique. En déterminant et en quantifiant les pas et leur taille durant le déplacement, il est possible de connaître la distance parcourue sans double intégration temporelle. Le but sera donc de détecter certains motifs synonymes de mouvement et de leur faire correspondre quantitativement un espace tridimensionnel parcouru. Utiliser la physiologie au service de la navigation, tel est l'un des intérêts majeurs de cette recherche.

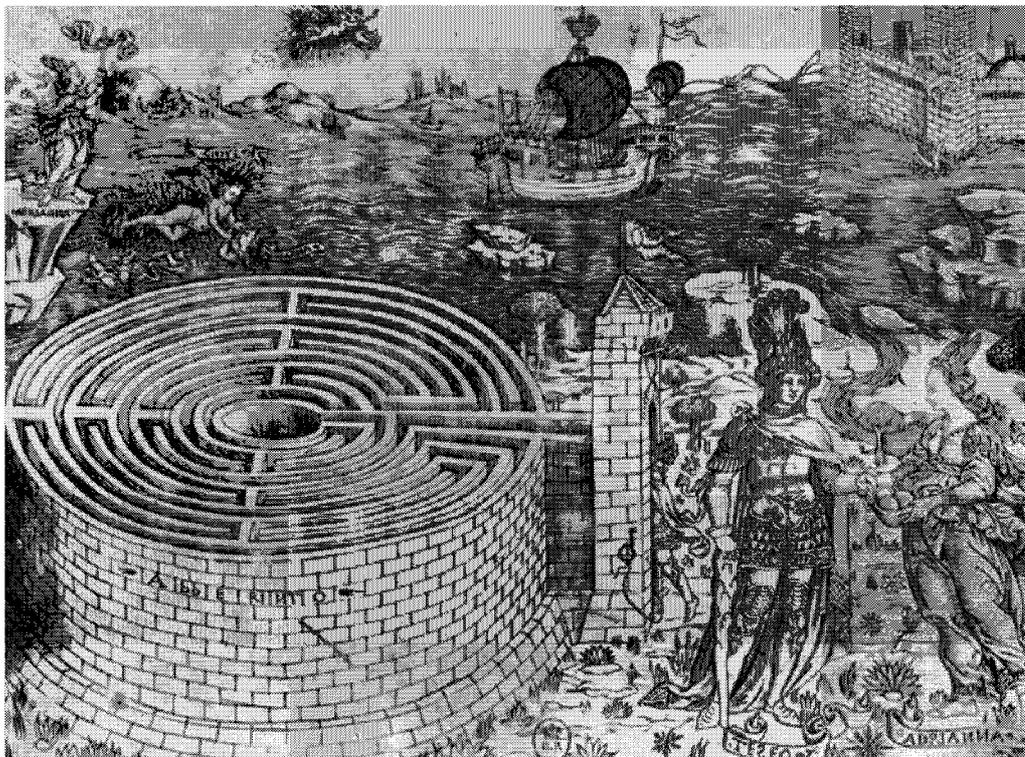


FIG. 1.1 – *Le Labyrinthe de Crète et l'histoire de Thésée et d'Ariane. Vers 1460-1475. Burin en matière fine, 193 x 250. Avec l'aimable permission de la Bibliothèque Nationale de France, Paris.*

## 1.1 Contexte

Connaître la position d'une personne en tout temps et en toutes circonstances fascine et inquiète à la fois. Les notions de confidentialité de l'information et de liberté fondamentale de l'individu prennent ici tout leur sens. Le présent travail n'a pas pour but initial le contrôle de la mobilité individuelle, mais il serait naïf et illusoire de prétendre qu'il n'y contribue point.

La motivation principale provient des limitations mêmes des différents systèmes satellitaires utilisés pour la localisation. Dans des conditions favorables, la position d'un piéton

peut être calculée avec une précision de quelques dizaines de mètres à quelques centimètres selon le type de récepteur satellitaire utilisé. Sous un couvert végétal dense, dans des canyons urbains ou à l'intérieur des bâtiments, les signaux provenant des satellites ne peuvent pas être fiablement utilisés. Afin de pallier à cet inconvénient majeur, un système autonome doit pouvoir continuer la localisation lors de la perte de tout signal externe. On recourt à la *navigation à l'estime* en référence à ce qui est pratiqué dans la marine. Deux types d'applications sont considérés ici qui se différencient par le mode de traitement des données. Une grande précision dans les trajectoires de même qu'une analyse détaillée de celle-ci nécessitera l'utilisation de toute l'information disponible: une approche en post-traitement est donc souhaitable. Si la position instantanée est le paramètre d'intérêt, le calcul en temps réel devient indispensable, avec le risque prévisible d'une perte de précision. La première catégorie vise principalement à faciliter le lever topographique de détail en terrains difficiles, ou l'établissement d'inventaires forestiers.

Dans le monde médical, il sera également possible de déterminer la dépense énergétique des patients dans des conditions nettement plus proche de la réalité que lors des tests réalisés en laboratoire (projet du Fonds National pour la recherche scientifique n° 3200-055 928.98/1 *Assessment of physical activity pattern and energetic cost of displacement in humans based on satellite positioning (GPS) and accelerometry*). Différents modèles mettant en relation la consommation calorifique, la vitesse de marche et le type d'activité effectué bénéficieront d'un positionnement tridimensionnel permanent.

Ouvrir la ville aux personnes aveugles et malvoyantes définit l'idéal visé par les applications en temps réel. Il n'est pas question de prétendre remplacer le chien ou la canne blanche, mais de leur permettre, par l'intermédiaire d'un système d'information géographique (SIG) et d'une interface appropriée, de connaître leur environnement immédiat, c'est à dire le nom de la route, le type de commerce à proximité, etc. La fiabilité de l'information, plus ici que sa précision, joue un rôle primordial. Le domaine de la sécurité (militaire ou policière) où toute personne, en plus de sa position, est intéressée par celle de ses partenaires bénéficie également de développements spécifiques.

La présente recherche a donné lieu et fut en partie réalisée dans le cadre du projet n° 5372.1 de la Commission pour la Technologie et l'Innovation (CTI) intitulé *FitNav: A combined sensor system for integrated personal navigation*. Ce projet a pour but la réalisation d'un produit industriel utilisant les algorithmes décrits dans ce document et partiellement contenus dans la demande de brevet *US Pedestrian navigation method and apparatus operative in a dead reckoning mode*.

## 1.2 Objectifs

L'originalité de ce travail réside dans la mise en commun et l'adaptation de nombreux domaines d'expertises afin de déterminer en permanence la position d'une personne. La recherche en physiologie diffère grandement de celle en ingénierie quant à la validation des différents modèles. De par la diversité des personnes, la normalisation des paramètres d'intérêt ainsi que les phases de test jouent une importance majeure dans l'adéquation des modèles. A cette fin, quelque 31 personnes ont participé à cette étude et plus de 550 km furent parcourus dans différentes circonstances.

Une précision sur la position inférieure à 5% de la distance parcourue est souhaitée pour la navigation à l'extérieur aussi bien qu'à l'intérieur des bâtiments. Afin de satisfaire

à ces exigences et une fois les modèles biomécaniques déterminés, les aspects suivant seront traités.

- **Réalisation d'un prototype.** Le choix des différents capteurs, leur assemblage physique ainsi que la synchronisation de toutes les données est le point de départ logique pour la réalisation d'un système de navigation. Une attention particulière devra être apportée à la miniaturisation, précision et consommation énergétique des différents composants.
- **Analyse temporelle.** L'analyse essentiellement temporelle des différents phénomènes doit mener à des modèles conceptuellement indépendant de l'analyse fréquentielle effectuée dans Levi et Judd (1996).
- **Auto-calibrage continu des différents modèles.** Les caractéristiques individuelles de marche échappant à toute normalisation, une adaptation des différents paramètres est nécessaire à l'optimisation des résultats. Cette étape se réalisera aux moyens de filtres principalement lorsque les signaux satellitaires seront disponibles ou sur des tronçons à distance et/ou orientation connues. Des approches distinctes seront développées selon que les mises à jour ont lieu en temps réel ou en post-traitement.
- **Calibrage des différents senseurs.** L'utilisation de capteurs autonomes sensibles à diverses perturbations externes requiert des procédures de calibrage spécifiques à la navigation pédestre. Celles-ci, en plus de leur efficacité, doivent être simples, rapides et réalisables dans un espace minimum. Plusieurs options seront comparées sous diverses circonstances.
- **Utilisation minimale des signaux satellitaires.** En se déplaçant en milieu urbain, le cumul des obstructions causées par les bâtiments ajouté à la marche le long des trottoirs réduisent la visibilité du ciel au minimum. Le calcul d'une position fiable devra donc permettre le calibrage d'autant d'éléments possibles tels que le défaut d'alignement du système ainsi que les paramètres du modèle de marche.

Élaborer de nouveaux algorithmes au service d'un nouveau système pour la navigation pédestre constituent les objectifs de ce travail de doctorat.

## 1.3 Méthodologie

La pluridisciplinarité de l'approche adoptée dicte de manière naturelle la méthodologie requise dans des domaines aussi différents que complémentaires. La recherche sera menée en trois phases bien distinctes donnant naissance également aux trois chapitres principaux de ce document.

1. **La biomécanique de la marche.** Cette recherche débute par une étude physiologique de la marche sans contrainte. Afin de modéliser correctement la marche chez un être humain, il est nécessaire de comprendre l'influence sur celle-ci de divers phénomènes. Le rôle de la gravité impliquant une énergie pendulaire lors des déplacements permettra une analyse plus appropriée des signaux accélérométriques. La variation de la taille des pas en fonction de la cadence et/ou de la vitesse de déplacement, elles-mêmes influencées par la pente du terrain, sont des relations indispensables à établir. Finalement, la validation ou adaptation des modèles à la dynamique de marche de chacun et plus spécifiquement des aveugles sera étudiée par l'intermédiaire de nombreux essais.

2. **Mesures et modèles.** La deuxième phase se concentre sur la compréhension et l'expression mathématique des différents phénomènes mesurés. Toute mesure ayant nécessairement une imprécision, la quantification de cette dernière de même que les approximations spécifiques à cette application sont considérées.
3. **Instrumentation et algorithmique.** Cette phase représente le sujet central de l'étude en se concentrant sur les algorithmes de navigation. Les capteurs, la procédure d'initialisation ainsi que les différentes options retenues et les particularités de la navigation pédestre y sont décrites. Le filtrage de l'azimut de déplacement, résultat du couplage optimal entre un compas magnétique et un gyroscope, est l'un des aspects les plus délicats. La détection de motifs caractérisant certains mouvements particuliers permet d'augmenter le détail et d'affiner les trajectoires calculées.

Toute la recherche effectuée est orientée afin que les différents modèles utilisés s'adaptent automatiquement aux caractéristiques individuelles de l'utilisateur. En ne cherchant point à adapter les techniques de navigation classiques à un cas particulier, la méthode développée est propre à la marche et ne peut être directement appliquée à d'autres modes de déplacement. Loin d'être un désavantage, cet aspect permet de prendre en considération des paramètres tels que le niveau de stress urbain présumé d'une personne et son état réceptif à toute communication. Ces différents indicateurs permettent de prévoir ou d'exclure certains types de déplacement influençant par là-même les traitements effectués. La présentation vocale ou visuelle de la position tout comme son interaction avec des cartes géo-référencées et des bases de données offrent au piéton une information adaptée à ses besoins. En considérant également sa dynamique instantanée dans la notification et le contenu du message transmis, l'intelligence artificielle effectue à ses premiers pas au service de la navigation pédestre.

## Bibliographie

- Chatenay, A. (2000). Seismic surveys - getting geophysical with GPS. *GPS World*.
- Gillet, J., Scherzinger, B. M., et Lithopoulos, E. (2000). Internal/GPS system for seismic survey. SEG 2000 Convention and Trade Show, Calgary (AB).
- Hamilton, E. (1978). *La mythologie*. Marabout Université.
- Levi, R. W. et Judd, T. (1996). Dead reckoning navigational system using accelerometer to measure foot impacts. US Patent 5'583'776.
- Soehren, W. et Keyes, C. (2000). Human-motion-based navigation algorithm development. In *IEEE Positioning, Location, and Navigation Symposium (PLANS)*.



## Chapitre 2

# De la biomécanique de la marche à la quantification du déplacement

*A voir marcher quelqu'un, on connaît sa pensée.*

Petrone

Les différentes approches utilisées pour modéliser les déplacements de personnes font appel à la détection de caractéristiques spécifiques de la marche. Afin de bien cerner l'importance de ces paramètres dans les modèles développés, une analyse biomécanique du déplacement humain est nécessaire. Intuitivement, une personne mesurant 1.90 m marchera plus rapidement qu'un individu de 1.60 m. Ceci peut se révéler faux si la fréquence des pas vient à compenser la taille des enjambées. Comment donc interagissent les quelques informations disponibles a priori telles que la taille, l'âge et le sexe de la personne? Induisent-elles un type de marche pré-défini, une fréquence de pas optimale pour chaque individu? Le présent chapitre permettra de répondre à ces questions ainsi que de définir les motifs synonymes de mouvement.

### 2.1 Le rôle de la gravité dans la marche et l'énergie pendulaire

La force d'attraction exercée par la Terre sur les êtres humains joue un rôle fondamental quant à la façon de se déplacer. Grâce à elle il est possible de frapper le sol sans perdre contact avec lui. Par contre elle est également responsable du travail mécanique nécessaire à chaque pas pour soulever le corps, même lorsque l'on se déplace sur un terrain plat. Cette force omniprésente et cependant bien discrète est connue sous le nom de «pesanteur» ou «gravité». Le travail mécanique d'un piéton qui se déplace se divise en travail extérieur et intérieur comme présenté de manière très complète dans Cavagna (1969). Le travail

extérieur est le travail accompli par la résultante des forces exercées par les muscles contre la résultante de toutes les forces extérieures s'appliquant sur le corps par le sol et par l'air.

$$W_{ext} = \vec{F} \cdot \vec{d} \cdot \cos \alpha = F_v \cdot d_v + F_{ap} \cdot d_{ap} + F_l \cdot d_l = W_v + W_{ap} + W_l \quad (2.1)$$

où  $\vec{d}$  est le déplacement du centre de gravité du corps,  $\alpha$  est l'angle compris entre les deux vecteurs  $\vec{F}$  et  $\vec{d}$ ;  $F_v, d_v, F_l, \dots$  sont les projections de  $\vec{F}$  et  $\vec{d}$  dans les directions verticale (v), antéro-postérieure (ap) et latérale (l).  $W_v, W_{ap}$  et  $W_l$  sont les travaux correspondants. Le centre de gravité tient compte des différentes attitudes prises par les membres durant la marche. Son mouvement n'est donc pas confondu avec les déplacements du tronc. Le travail intérieur n'implique lui aucun déplacement du centre de gravité, même s'il peut être utile pour disposer le corps de façon à mieux produire du travail extérieur. Il est la somme des travaux effectués par toutes les forces intérieures.

La gravité interagit de manière continue avec la décélération provoquée par le sol de manière à conserver le total énergétique. A chaque pas, le corps est décéléré à cause du lien entre le centre de gravité et le point de contact du pied avec le sol. Dans une marche vers l'avant, ce point se trouve devant le centre de masse et provoque de ce fait une décélération, comme représenté à la Fig. 2.1. Cette décélération a pour conséquence une perte d'énergie cinétique

$$\Delta E_{k,ap} = 0.5 \cdot M \cdot (V_{ap,max}^2 - V_{ap,min}^2) \quad (2.2)$$

où  $M$  égale le poids de la personne et  $V_{ap,max}^2$  et  $V_{ap,min}^2$  respectivement le carré des vitesses antéro-postérieures maximales et minimales du centre de masse durant chaque pas. La direction de la ligne qui unit le centre de gravité vers le point de contact du pied au sol est dirigée en avant et vers le bas. Dans cette direction, la composante de la vitesse du centre de gravité est réduite à zéro lorsque le pied touche le sol. Il en résulte une décélération qui sera d'autant plus grande que le vecteur unissant le centre de gravité au point de contact sera proche de l'horizontale. Lors d'un déplacement vers l'arrière, le vecteur est bien souvent en une position verticale, le centre de gravité pouvant même entraîner le mouvement en se trouvant cette fois-ci au-delà du point de contact, dans la direction du mouvement.

Comme la longueur du pas augmente en règle générale avec la vitesse, la direction du vecteur s'éloignera de la verticale, causant une plus grande décélération du corps en avant. On comprend dès lors la relation de la composante  $W_f$  avec la vitesse moyenne de déplacement.

Pendant cette décélération, le centre de masse s'est élevé; la perte d'énergie cinétique a ainsi été transformée en une augmentation d'énergie potentielle

$$\Delta E_p = M \cdot g \cdot S_v \quad (2.3)$$

où  $g$  est l'accélération due à la gravité et  $S_v$  est le déplacement vertical du centre de masse à chaque pas. Pour des vitesses de marche habituelles, les courbes d'énergie cinétique et potentielle sont en opposition de phase: il y a donc transfert d'énergie cinétique en énergie potentielle et vice versa, comme c'est le cas pour un œuf roulant autour de son axe majeur. Une augmentation de vitesse aura donc pour effet un allongement des pas simultanément à une variation verticale du corps plus marquée. Ceci s'explique principalement par le fait

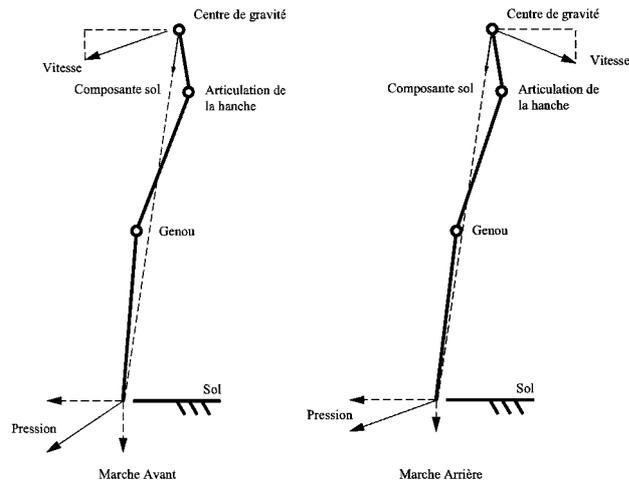


FIG. 2.1 – Différentes réactions du sol pour une marche avant et arrière. Dans une marche arrière, la résultante des forces a tendance à être dirigée dans la direction du mouvement. Dans la marche avant, au contraire, la pression exercée sur le sol freine l'avancement de la personne (Cavagna, 1969).

qu'à une vitesse plus élevée, la flexion de la hanche de la jambe avant ainsi que l'extension de la cheville arrière sont augmentées. Au moment où le talon touche le sol, le tronc sera de ce fait à une position verticale inférieure pour les plus grandes vitesses.

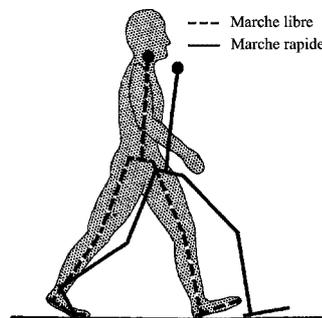


FIG. 2.2 – Représentation des différentes positions du corps entre une marche normale et une marche rapide, tiré de Murray (1967)

Différentes études ont montré indépendamment que si la vitesse augmentait, la fréquence des pas également (Margaria et al., 1966; Margaria, 1976; Cavagna et Franzetti, 1986; Cavagna et al., 2000). Il apparaît donc que la taille et la fréquence des pas sont directement corrélées à une augmentation de vitesse.

Les fréquences de pas pouvant dans des cas extrêmes arriver à 5 Hz, il est intéressant de connaître le contenu fréquentiel présent dans les différents rythmes de marche. Cette information est indispensable pour choisir le type de capteurs nécessaires à l'analyse et surtout à la détection des motifs caractéristiques du déplacement. De précédentes recherches (Antonsson et Mann, 1995; Aminian et al., 1995; Capozzo et al., 1975) convergent à montrer qu'aucune composante accélérométrique significative ne se trouve au-dessus de 15 Hz, et cela quelle que soit la dynamique adoptée. En accord avec le théorème de Shannon (Shannon, 1949) il est donc nécessaire d'échantillonner le signal à une fréquence minimale de 30 Hz afin de ne rien perdre de l'information contenue dans celui-ci.

Pour que la marche puisse s'effectuer vers l'avant, la jambe ayant contact avec le sol doit non seulement retenir, soutenir, mais également propulser le centre de gravité afin que le vecteur force ne soit plus dirigé vers l'avant mais vers l'arrière. La succession de tous ces mouvements peut être décrit au travers d'un processus cyclique qui, répété à l'infini, permet le déplacement. Un cycle de marche se définit par l'intervalle entre deux instants successifs où le même pied est en contact avec le sol (droite-droite, gauche-gauche). Pour la plupart des personnes, l'impact du talon marque le contact initial entre le pied et le sol. Un cycle pour le pied droit comprend une période de support (stance) suivie d'une période de balancement (swing). La phase de support est la période durant laquelle le pied est en contact avec le sol. La phase de balancement correspond, elle, au moment où le pied quitte le sol et se déplace vers l'avant pour créer le prochain pas. Comme les périodes de support et de balancement se produisent alternativement sur les deux jambes, chaque membre doit permettre à l'autre ces deux phases afin de créer le balancement vers l'avant du prochain pas. La répétition séquentielle du cycle permet la marche. Cette dernière se caractérise donc par le fait que chaque pied en phase de support reste en contact avec le sol jusqu'à ce que le pied opposé ait effectué le contact. Ainsi, durant chaque cycle, il y a deux périodes de support sur une jambe et deux périodes de support sur deux jambes, lorsqu'un membre débute et l'autre termine sa phase de support.

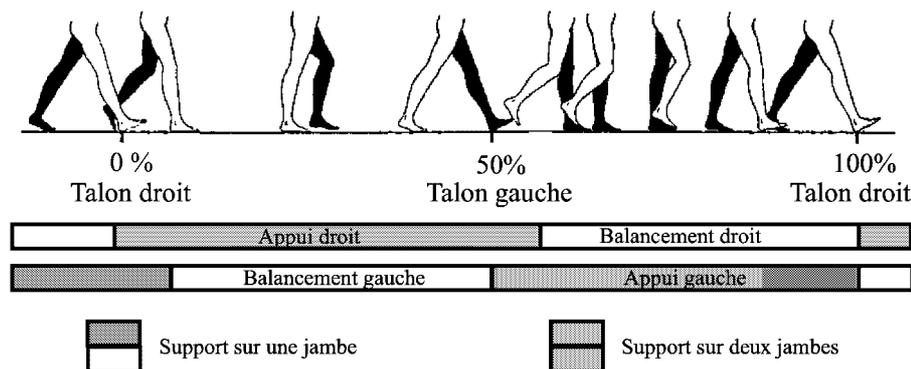


FIG. 2.3 – Description temporelle des périodes d'appuis et de balancement des jambes durant un cycle de marche, tiré de Murray (1967)

La jambe se trouvant à l'avant retient le centre de masse d'un mouvement exagéré vers l'avant alors que la deuxième jambe, dirigée obliquement vers l'arrière, propulse le corps vers l'avant. Grâce à cette succession de mouvements, le tronc est translaté vers l'avant à une vitesse horizontale relativement constante. La taille d'un pas (step length) est la distance linéaire entre deux contacts successifs avec le sol de pieds opposés (droite-gauche, gauche-droite). Les termes «enjambée», «foulée» et «taille de pas» sont considérés comme synonymes. Un cycle de marche (stride) se compose lui de deux pas successifs. La distance (stride length) correspond donc à la distance linéaire entre deux contacts successifs du même pied sur le sol. La notion de distance linéaire est primordiale car elle montre l'importance de connaître les mouvement dans les 3 dimensions de l'espace. La cadence (ou fréquence) est la mesure de la rapidité avec laquelle des pas sont effectués. Elle est logiquement et directement liée à la durée du cycle de marche. Ces différents paramètres serviront de variables dans les modèles de vitesse et de taille de pas, nécessaires à l'estimation de la distance de parcours.

Afin de comprendre les choix retenus pas la suite dans le filtrage des données, il est nécessaire de considérer les rotations survenant durant un cycle de marche, et cela aux

niveaux du bassin et du thorax. Comme ces deux emplacements représentent les parties du corps les plus propices à l'emplacement des senseurs, ces rotations auront une influence directe dans le calcul de l'azimut de déplacement.

Le bassin et le thorax pivotent dans des directions opposées provoquant des torsions du tronc durant la marche. Ces mouvements sont décrits en détails dans Murray (1967) et Wall et al. (1981). Il ressort que ces rotations sont très variables d'une personne à une autre. Pour le bassin, les amplitudes de rotation sont de l'ordre de  $11^\circ \pm 4^\circ$  pour une marche libre, comparées à  $16^\circ \pm 7^\circ$  pour une marche rapide. Les valeurs correspondantes pour le thorax sont elles de  $7^\circ \pm 2^\circ$  et  $9^\circ \pm 3^\circ$ .

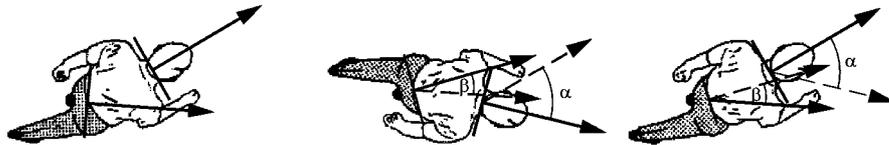


FIG. 2.4 – Rotations inverses de la taille ( $\beta$ ) et des épaules ( $\alpha$ ) durant la marche. Ces mouvements, pouvant être supérieurs à  $10^\circ$ , devront être filtrés afin de permettre une détermination optimale de l'azimut de déplacement, inspiré de Murray (1967).

### 2.1.1 La course: une marche plus rapide?

Les différentes modélisations et analyses effectuées jusqu'ici sont valables uniquement pour la marche. En effet, durant la course, le centre de masse s'abaisse lors de la décélération vers l'avant et s'élève durant l'accélération. Les deux changements d'énergies cinétique et potentielle du centre de gravité sont donc absorbés et restaurés par les muscles et les tendons.

Durant la marche, au contraire, les deux énergies sont en opposition de phase. L'absence de support simultané des deux pieds sur le sol durant une période de course est également une différence majeure, cf Fig. 2.5. L'augmentation de la taille des pas en fonction de la vitesse trouve un maximum lors de la course. Pour des vitesses supérieures à 10-16 km/h selon les personnes, l'accélération ne provient plus d'une augmentation de la foulée, mais de la fréquence de pas, alors que sa longueur demeure constante. Ces quelques aspects permettent de se rendre compte intuitivement de la nécessité d'études spécifiques au domaine de la course, en opposition à une simple extension des modèles proposés pour la marche. Cet aspect sortant du cadre de ce travail, une validation des modèles établis par Cavagna et Franzetti (1986) et Kaneko et al. (1987) permet de différencier les deux phénomènes.

Lorsqu'une personne court, et cela quelle que soit sa taille, elle augmente significativement la cadence des pas, même par rapport à une marche rapide. Si pour des marches rapides la fréquence atteint 2.2 Hz (Fig. 2.10), celle-ci, pour une course libre, ne descend guère au-dessous de 2.7 Hz. Les différents modèles proposeront donc, de façon binaire, une fréquence de marche inférieure à 2.5 Hz comme représentative de la marche et supérieure comme synonyme de course.

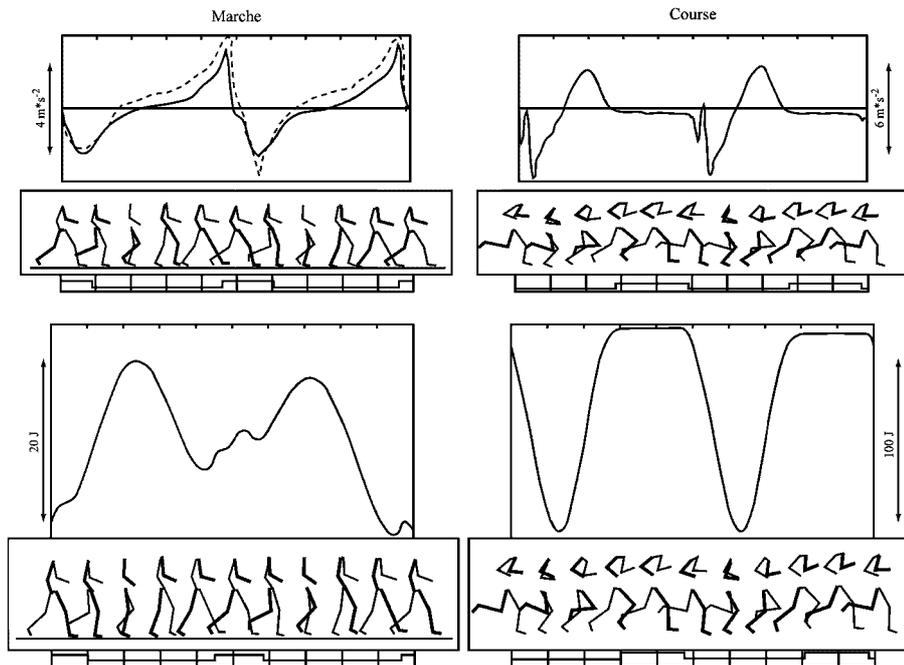


FIG. 2.5 – *Partie supérieure: Accélérations antéro-postérieures du centre de masse (CDM) dans la marche et la course. La ligne en pointillé décrit l'accélération telle que perçue à l'emplacement des capteurs (taille). De par leur similitude, on considérera les deux mouvements comme solidaires. Partie inférieure: Énergie mécanique du CDM dans les deux conditions. Les phases de double appui (marche) ainsi que de vol (course) sont indiqués par un décalage supérieur du trait dans les graphiques du bas, adapté de Cavagna et Franzetti (1986).*

### 2.1.2 Conclusion

Les mouvements spécifiques de la marche tels que décrits jusqu'ici peuvent se résumer avec les assertions suivantes.

- A chaque pas, le corps est accéléré et décéléré dans la direction antéro-postérieure du mouvement.
- Lors de chaque pas, la diminution de l'énergie cinétique est compensée par une augmentation de l'énergie potentielle se traduisant par une élévation verticale du centre de gravité.
- Plus la vitesse de marche est élevée, plus la taille des pas est grande et plus la variation verticale du corps est marquée.
- Plus la vitesse de marche est élevée, plus la cadence des pas est importante.
- Durant la marche, le bassin et le thorax pivotent de manière opposée. Plus la vitesse augmente, plus les amplitudes de rotation sont élevées.
- Le 99% de la puissance du signal accélérométrique de la marche étant inférieur à 15 Hz, une fréquence d'échantillonnage minimale de 30 Hz est nécessaire pour pouvoir préserver toute l'information contenue dans le signal.
- Une fréquence de pas inférieure à 2.5 Hz est représentative de la marche alors que toute fréquence supérieure est synonyme de course.
- Les différents modèles décrivant la marche ne sont en général pas directement utilisables pour la course.

Tous ces aspects vont jouer un rôle prépondérant aussi bien dans les méthodes développées pour la modélisation de la marche que pour le choix et l'emplacement des différents senseurs.

## 2.2 Modélisation de la taille des pas

A l'analyse qualitative de la marche fait suite une recherche quantitative visant à déterminer la vitesse instantanée de déplacement ainsi que la taille des pas. De nombreuses études en ingénierie biomédicale se sont efforcées de mettre en relation les différents paramètres observables de la marche afin de prédire les distances parcourues (Margaria, 1976; Margaria et al., 1966; Hirokawa et Matsumara, 1987; Rosenrot et al., 1980; Murray et al., 1984). La grande majorité de ces tests ont été effectués en laboratoire dans des conditions particulières plus ou moins éloignées des contraintes de la vie quotidienne. Les résultats obtenus, s'ils permettent une mise en évidence de certaines corrélations, ne peuvent être utilisés tels quels dans cette recherche. Les présents efforts ont donc pour but d'établir un modèle physiologique pour le calcul de la taille des pas en fonction des différents paramètres observables. Cette distance parcourue, résultant de la conjugaison de divers phénomènes stochastiques, se révèle très complexe à modéliser puisqu'elle présente non seulement une variation inter-individuelle mais également une évolution personnelle.

### 2.2.1 Cadre de réflexion, idée poursuivie

A l'instar des empreintes digitales, chaque personne a un profil de marche qui lui est propre (Little et Boyd, 1998; Nixon et al., 1999; Hayfron-Acquah et al., 2001). Ainsi, si le contenu fréquentiel varie autant, l'établissement de tout modèle général nécessitera obligatoirement un processus de normalisation suivi d'une phase d'adaptation. Normalisation, parce que la fréquence de pas, lors de déplacement sans contraintes, est à peu près semblable pour tous les individus. Les différences de vitesse sont donc une conséquence directe de la taille des pas, comme établi précédemment. L'hypothèse que la taille des pas est proportionnelle à la taille de la personne, ou plus justement à la taille des jambes de la personne, est raisonnable. En normalisant la vitesse de déplacement en fonction de ces paramètres, il est donc théoriquement possible de passer de modèles individuels à un modèle plus universel.

Chaque enjambée n'est cependant, et heureusement, pas égale à une valeur fixe. La variabilité des foulées en référence à une constante, chez une même personne et à une fréquence donnée, est de fait impossible à prédire. Le but ne sera donc pas de modéliser un événement «pas» de manière précise, mais de reproduire une distance parcourue, composée d'un ensemble de pas, le plus fidèlement possible. Cette approche se base sur un concept pouvant s'énoncer de la manière suivante: ***”Pour une fréquence de pas donnée, la taille des pas chez une même personne peut être considérée comme constante. La variation naturelle de ceux-ci suit une loi normale centrée à l'origine et dont la variance est inversement proportionnelle à la fréquence de marche”***. Cela signifie qu'à un pas plus long correspondra un pas plus court, ramenant la distance parcourue en un nombre déterminé de pas, pour une fréquence donnée, à une valeur considérée constante. Les différences de taille entre deux pas successifs seront elles d'autant plus

importantes que la vitesse et la fréquence de pas seront lentes. Le tableau Tab. 2.1 présente les résultats sur la variation individuelle des pas en fonction du rythme de marche.

Personne	Marche lente [cm]	Marche rapide [cm]	Marche normale [cm]
1	12	4	5
2	7	3	3
3	10	3	5
4	11	1	5
5	13	3	4
6	8	5	4
7	9	4	6
8	10	3	5
9	13	7	4
10	12	3	6
11	9	2	2
12	6	6	8
13	8	3	6
14	10	5	8
15	11	4	5

TAB. 2.1 – Variation de la taille des pas en fonction du type de marche. Sur un parcours de 1 km les personnes ont été priées de marcher librement à différents rythmes. Le parcours libre est de 3.6 km. Il ressort que si la variabilité interne est similaire pour une marche rapide et normale, une marche lente implique une taille de pas très variable et, par là même, difficile à prédire.

En opposition à toutes ces tentatives de modélisation, il faut mentionner la liberté quasi totale dont jouissent les personnes dans les modes de marche, ainsi que l'influence directe plus ou moins importante du type de sol. La fatigue, l'entraînement, la neige, le sable, une marche en forêt peuvent rendre inutile un modèle parfaitement calibré pour un autre environnement et dans des circonstances différentes. Une adaptation des paramètres ne pourra donc être possible que par l'apport d'informations extérieures. Comme il sera développé ci-dessous, cela peut se réaliser grâce à un calibrage continu faisant appel soit aux signaux satellitaires GPS, soit à une interaction directe avec l'utilisateur.

Les contraintes directionnelles lors de la marche sont faibles, voire inexistantes. Elles sont principalement réglées par le type d'activité effectuée. Si une personne se déplace vers l'avant dans le 99% des cas, des mouvements latéraux de même que des pas à reculons sont fréquents dans certains contextes tels que le déplacement d'aveugles, des opérations de pompiers ou militaires. La distance parcourue dans de telles circonstances requiert une approche et une logique particulière, adaptée à chaque circonstance. Elle sera néanmoins déduite de la taille des pas d'une marche avant normale. Il est également nécessaire de mentionner que les diverses relations établies privilégient la robustesse à la complexité et à la spécificité. L'ajout de paramètres dans un modèle a généralement pour conséquence d'optimiser localement les résultats tout en se révélant très sensible à une modification des conditions de calibrage. L'augmentation de la corrélation entre les variables plaide également en faveur de modèles minimaux où les variables seraient, dans l'idéal, toutes indépendantes. L'approche choisie fera finalement intervenir des notions a priori "évidentes" permettant de détecter toute divergence ou mauvais calibrage des modèles. La probabilité qu'une personne mesurant 1.60 m effectue des enjambées supérieures à un mètre ou inférieures à 30 cm est très faible. Ce raisonnement peut être effectué pour les autres paramètres. Les différentes fonctions seront donc bornées afin de toujours garantir des valeurs

plausibles.

### 2.2.2 Modélisation de la vitesse: une importance majeure

La façon la plus immédiate d'obtenir un déplacement lorsque l'on travaille avec des signaux accélérométriques est la double intégration temporelle de l'accélération. Au vu de l'application et du type de senseurs utilisés, cette approche ne permet pas de garantir la précision souhaitée. En effet, afin de déterminer la taille d'un pas à 5 cm, il est nécessaire de connaître l'accélération avec une précision d'environ ( $distance = a \cdot t^2$ )  $0.2 \text{ m/s}^2$ . En prenant en compte le type de capteur, le mouvement de celui-ci durant la marche et l'influence de la gravité (amplitude de  $9.81 \text{ m/s}^2$ ), une telle exigence ne peut être satisfaite. L'établissement de différentes relations permet cependant de contourner cet inconvénient. Une partie de ces recherches ont été réalisées en collaboration avec M. Vincent Gabaglio et sont présentées de manière plus détaillées dans son travail de doctorat (Gabaglio, 2002). Comme dans le cadre de la double intégration, la détermination d'une distance parcourue s'effectuera par l'intermédiaire de la vitesse de déplacement, il est important de mentionner que les modèles de vitesses déduits le sont pour des surfaces planes. Si la personne se meut dans un environnement vallonné, la composante altimétrique sera ajoutée à la vitesse bi-dimensionnelle. Le changement d'altitude se caractérisant par une variation de pression, elle est mesurée grâce à un baromètre.

### 2.2.3 L'agitation: un indicateur de la vitesse?

Plus une personne avance rapidement, plus les mouvements effectués par la plupart des parties du corps sont importants. Ceci se traduit par une augmentation de l'amplitude du signal accélérométrique mesurée dans les trois directions de l'espace. Cette agitation générale peut être rendue par la variance ou l'écart type du signal considéré. La relation générale s'énonce comme suit:

$$\text{Vitesse plane} = A + B \cdot \text{var}(s)^C + D \cdot f \quad (2.4)$$

où  $A$ ,  $B$ ,  $C$  et  $D$  sont des paramètres résultant du calibrage,  $s$  le signal antéro-postérieur, vertical ou latéral et  $f$  la fréquence de pas. A noter que pour chaque signal accélérométrique considéré, tous les paramètres sont différents. Une description plus précise de cette approche peut être trouvée dans Ladetto (2000); Gabaglio et Merminod (2000). Cette modélisation fournit de très bon résultats si l'environnement ne change pas durant les mesures, Fig. 2.6. Malgré des essais prometteurs, quelques aspects mentionnés ci-après rendent cette approche peu robuste.

- La relation directe avec l'amplitude du signal rend le modèle dépendant du style de marche de la personne: un calibrage individuel est donc indispensable.
- Pour un même individu, les signaux mesurés sont fortement dépendants de l'emplacement des capteurs.
- Si une variation survient dans l'attache des capteurs (attache plus lâche, ceinture desserrée, ...), un battement parasite peut facilement apparaître, augmentant de ce fait la variation du signal et ainsi donc surévaluant la vitesse.
- Aucun paramètre de la marche n'est directement observé.

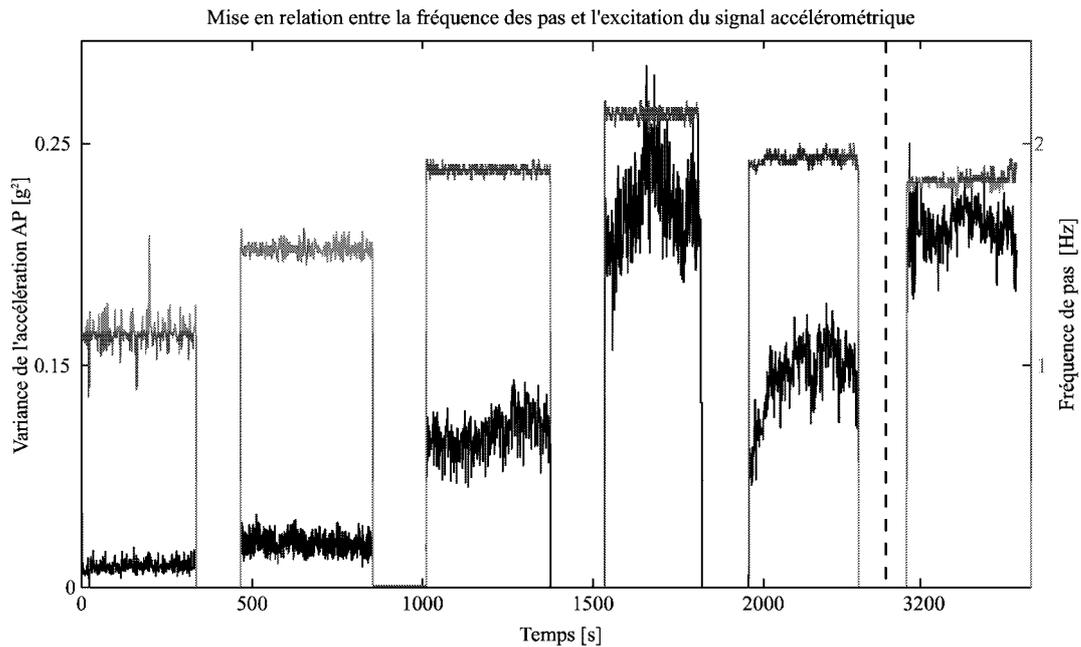


FIG. 2.6 – Relation entre la fréquence des pas et l'excitation du signal accélérométrique représenté ici par la variance de celui-ci entre deux pas. Les quatre premières séquences ont été réalisées à une fréquence donnée. Les deux dernières représentent des marches libres. Si les cinq premières sont proportionnelles, la sixième, suite à un relâchement de l'attache du capteur, présente des valeurs de variance supérieures, impliquant une vitesse modélisée plus élevée.

Une illustration de cette méthode est présentée à la Fig. 2.7 après calibrage individuel des différents paramètres. Ces tests ont été réalisés dans un environnement très pentu mettant en évidence également la nécessité de mesures barométriques pour une estimation correcte de la vitesse 3D. Les vitesses vraies ont été obtenues par GPS différentiel, mesures de phase après que la S/A (Selective Availability) ait été coupée, avec une précision inférieure à 5 cm/s (Bruton et al., 1999). Une analyse complète des résultats est décrite dans Ladetto et al. (1999); Perrin et al. (2000).

## 2.2.4 La cadence: le paramètre de la vitesse par excellence

L'utilisation de la fréquence d'un phénomène biomécanique pour l'estimation de la vitesse de la marche permet, à l'inverse de la méthode précédente, de s'affranchir de toute valeur numérique du signal. Le phénomène considéré peut différer selon les applications. Pour la marche, l'élévation cyclique du centre de masse ainsi que son accélération antéro-postérieure se révèlent les événements les mieux observables. L'utilisation du GPS différentiel phase a permis de quantifier ces amplitudes verticales, à la restriction du point de mesure près, situé sur la tête de la personne et non en son centre de gravité. Les oscillations varient de 3 à 10 cm en fonction de la vitesse de marche, cf Fig. 2.8. Ces valeurs demeurent passablement constantes indépendamment de la taille de l'individu. Les phénomènes cycliques considérés sont les accélérations verticales produisant ces élévations corporelles. Comme chaque abaissement correspond à un pas, et donc à une accélération antéro-postérieure, l'information contenue dans les deux signaux est identique à un déphasage près.

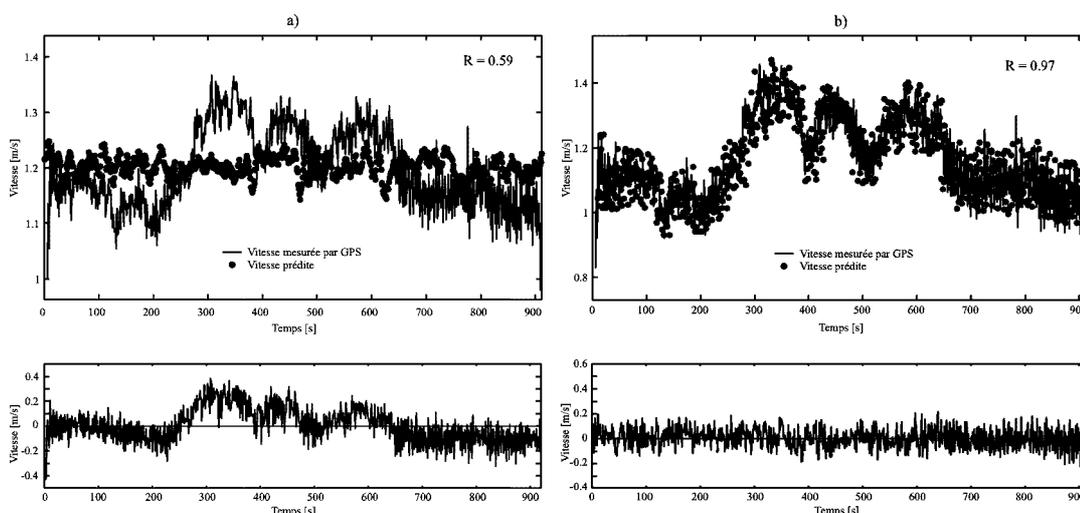


FIG. 2.7 – Estimation de la vitesse 3D en fonction du signal accélérométrique uniquement. Les résidus montrent une tendance marquée en fonction de la pente (a). La modélisation prenant en compte la vitesse ascensionnelle (b) permet une représentation plus conforme à la réalité, ce qui se traduit par une répartition aléatoire des résidus.

On remarquera que pour des moyens de déplacement tels que le patin à roulettes, le roller, le ski de fond, etc., la vitesse du centre de masse peut être maintenue constante grâce au glissement. L'accélération antéro-postérieure sera donc fortement diminuée alors que les mouvements verticaux sont, eux, toujours bien présents comme le montre la Fig. 2.9.

Les modèles retenus sont ceux faisant appels à des relations linéaires et exponentielles entre la fréquence de pas et la vitesse:

$$\text{Relation linéaire: } v = A + B \cdot f \quad (2.5)$$

$$\text{Relation exponentielle: } v = C \cdot f^D \quad (2.6)$$

où  $A$ ,  $B$ ,  $C$  et  $D$  sont des paramètres déterminés par régressions mathématiques.  $V$  est la vitesse relative par rapport à la taille ou la longueur de jambe de la personne. Le choix final d'un modèle plutôt qu'un autre est décidé empiriquement lors du processus de calibrage individuel comme le confirment les résultats obtenus au tableau Tab. 2.2. Cette normalisation a pour but de supprimer la relation entre la grandeur de la personne et sa vitesse de marche, cf (Fig. 2.10).

Ces vitesses peuvent être interprétées comme la fraction de taille ou de longueur de jambe parcourue en une seconde. Une étude similaire (Rosenrot et al., 1980) suggère que la normalisation par rapport à la longueur de la jambe conduit sensiblement à la meilleure modélisation. La longueur de jambe étant souvent modélisée comme une fraction définie de la stature (Winter, 1979), les différences entre ces deux représentations apparaissent comme négligeables. Malgré cette normalisation, la distinction des sexes s'opère pour la marche. Les femmes marchent en règle générale plus lentement que les hommes mais adoptent, pour une vitesse donnée, une cadence plus élevée et des pas plus courts.

Ces modèles, une fois calibrés avec un échantillon de personnes, ne requièrent donc

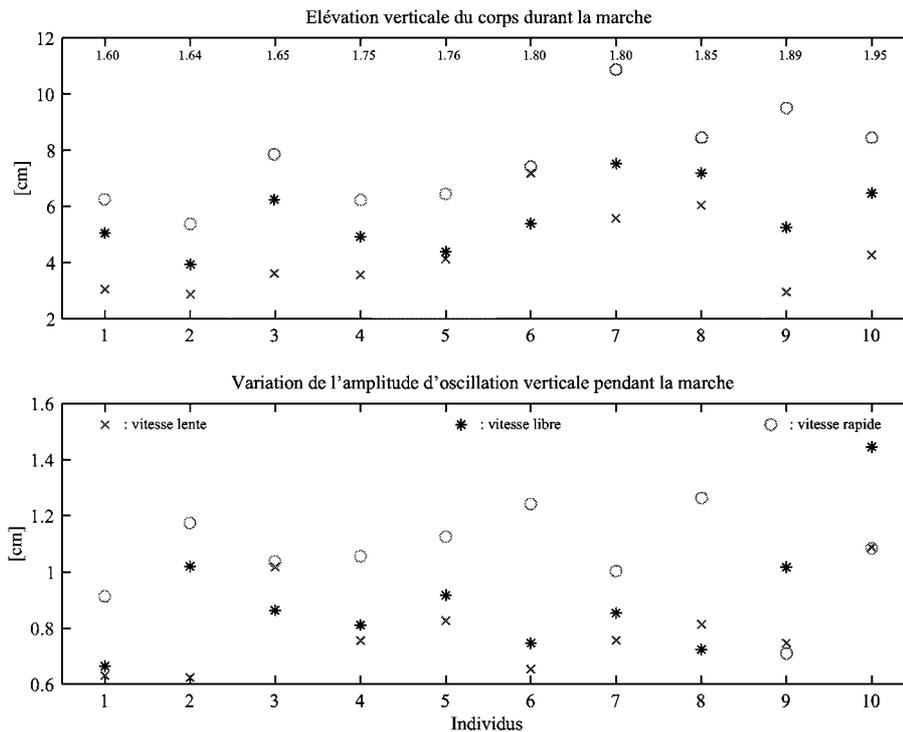


FIG. 2.8 – Les différents tests effectués montrent clairement une augmentation de l'oscillation verticale en fonction de la vitesse de marche. Cette valeur n'est cependant pas directement dépendante de la taille de l'individu. En effet, nous obtenons pour les 3 types de marche les corrélations suivantes, avec l'hypothèse d'un modèle linéaire: lente: 0.14, libre: 0.55, rapide: 0.25. Il est intéressant également de noter que les variations de ces hauteurs sont fonction de la vitesse et qu'elles présentent des valeurs constantes pour les mêmes types de marche. Corrélations de 0.06, 0.03 et 0.48 respectivement. Des représentations linéaires de ces paramètres en fonction de la taille de la personne sont donc jugés inappropriés (test de Student, 95%). Ces affirmations sont cependant à considérer avec réserve de par le faible nombre de personnes ayant participé aux tests (10).

Personne	Distance vraie [m]	Modèle linéaire [m][%]	Modèle curvilinéaire [m][%]	Différence [%]
1	3019	<b>2979 (-1.3)</b>	3087 (2.3)	3.5
2	1298	1253 (-3.4)	<b>1295 (-0.2)</b>	3.2
3	3680	<b>3612 (-1.8)</b>	3791 (3.0)	4.8
4	3680	3693 (0.3)	<b>3691 (0.2)</b>	0.0
5	1109	<b>1127 (1.6)</b>	1085 (-2.2)	3.8
6	764	784 (2.6)	<b>755 (-1.1)</b>	3.8
7	238	<b>234 (-1.6)</b>	231 (-2.9)	1.3
8	600	<b>611 (1.8)</b>	624 (4.0)	2.2
9	800	779 (-2.6)	<b>807 (0.9)</b>	3.5
10	1200	<b>1191 (-0.8)</b>	1312 (9.4)	10.0

TAB. 2.2 – Comparaison des distances calculées avec les modèles de vitesse linéaire et curvilinéaire. On remarque que même si les erreurs obtenues sont généralement inférieures à 5%, la modélisation linéaire fournit de meilleurs résultats.

aucun processus d'initialisation mis à part la connaissance de la grandeur de la personne. Un ajustement des paramètres est cependant souhaité afin de tenir compte de toute spécificité

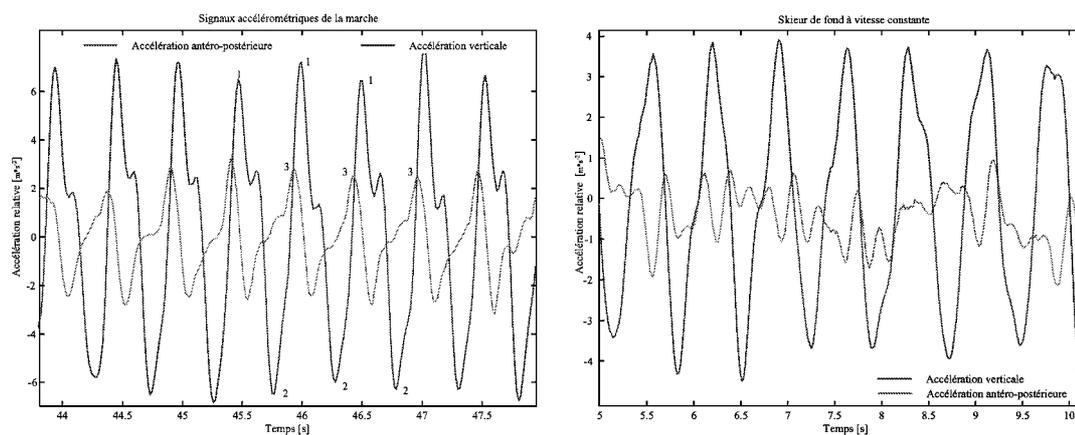


FIG. 2.9 – Détermination des différentes étapes de la marche par accélérométrie. Le centre de gravité se trouve au point le plus haut lorsque la personne se trouve en appui sur les deux jambes (1). En avançant une jambe, le centre de gravité s'abaisse, ceci a pour conséquence une accélération vers le bas (2), immédiatement suivie d'une accélération vers l'avant (3) avant de retrouver une position en double appui. Les deux motifs sont donc indissociables l'un de l'autre. Le déphasage des deux signaux représente un bon indicateur du mouvement ainsi que de son type. En maintenant une vitesse du centre de gravité plus constante (accélération  $\pm$  nulle) par l'intermédiaire du glissement de skis, les pics du signal antéro-postérieur sont supprimés. Le mouvement vertical est cependant maintenu.

individuelle.

### 2.2.5 La taille des pas en fonction de la vitesse de marche

Une fois la vitesse de marche déterminée, la taille des pas peut être déduite soit par intégration dans le temps, soit par l'établissement d'un second modèle biomécanique. La première solution se réfère à une approche de navigation classique alors que la seconde reflète le phénomène oscillatoire de la marche. Différentes fonctions ont été dérivées et testées (Ladetto, 2000) pour estimer la distance parcourue en un pas. Le modèle adopté dans toutes les circonstances produit les meilleurs résultats, et cela indépendamment de la personne. Il se base sur la relation suivante établie par Margaria et al. (1966):

$$L = a + b \cdot v \quad (2.7)$$

où  $L$  est la longueur du pas en [m], et  $v$  la vitesse tridimensionnelle en [m/s]. La distance parcourue à chaque pas se divise en deux composantes: la première est constante et indépendante de la vitesse alors que la seconde croît proportionnellement à celle-ci et se voit parcourue par un temps  $b$  constant. Il ressort également de l'équation que plus la vitesse est petite, plus le temps pour parcourir la fraction  $a$  est grande. Différents essais effectués dans des conditions variables confirment l'observation que la pente  $b = dl/dv$  de la droite est constante et égale à 0.3, quelle que soit la personne et le type de marche effectuée (montée, descente, sable, ...). Comme le paramètre  $b$  est fixe,  $a$  doit donc traduire une information sur la taille de la personne. Plus la stature est grande, plus la valeur de  $a$  sera élevée. La valeur approchée peut être calculée à partir des relations empiriques suivantes

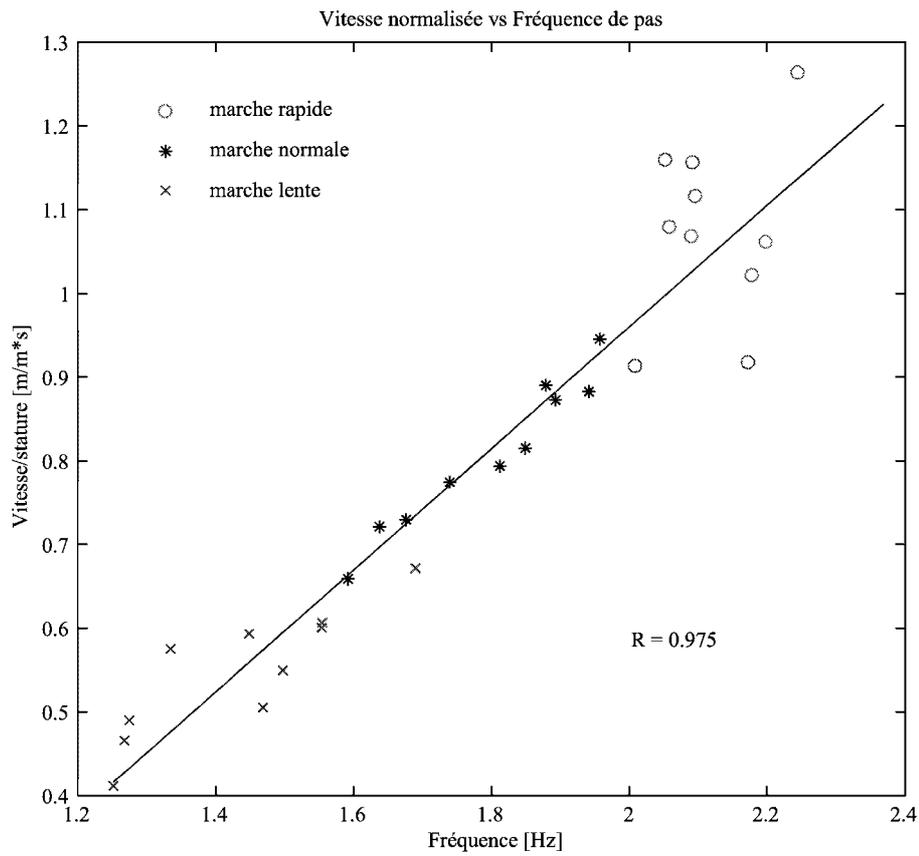


FIG. 2.10 – Exemple de relation linéaire entre la fréquence de pas et la vitesse normalisée par rapport à la taille de la personne. L'écart à la droite grandit sensiblement si l'on demande aux individus de marcher de manière lente ou rapide. Afin d'obtenir la vitesse de marche en [m/s], il suffit de multiplier la valeur de l'ordonnée par la taille, en mètre, de la personne.

faisant appel aux résultats obtenus précédemment:

$$\begin{aligned} \text{Taille d'un pas à vitesse libre} &= 45\% \text{ de la taille de la personne} \\ a &= 45 \% \text{ de la longueur d'un pas} \end{aligned}$$

Le paramètre  $a$  sera par la suite ajusté et adapté aux caractéristiques individuelles de l'individu ainsi qu'à son évolution.

### 2.3 L'influence de la pente dans la marche

Jusqu'à présent, toutes les relations concernant la marche ont été déduites pour une surface plane ou sans grande variation d'altitude (1-2%). Dans le but de définir l'influence de la pente sur la taille et la fréquence des pas, des tests ont eu lieu avec 21 personnes sur un parcours de 1310 m de long pour 67 m de dénivellation. Les résultats confirment une fois de plus le caractère individuel du mouvement, Fig. 2.11. Sur tous les participants, 8 gardent statistiquement (test de Student 95%) la même longueur de pas indépendamment de la pente et 5 maintiennent la cadence inchangée. Trois personnes parmi ces dernières présentent les 2 caractéristiques. Mis à part deux individus, tous les autres ont tendance

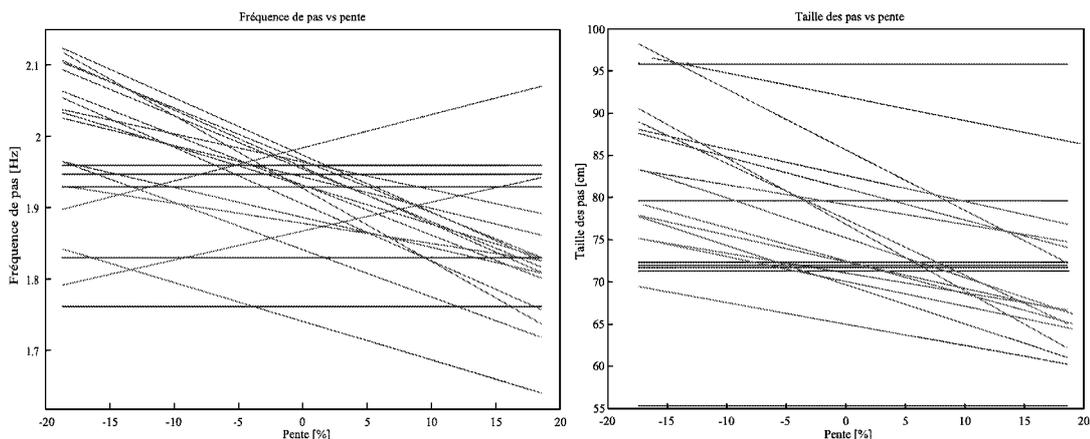


FIG. 2.11 – *Le rôle de la pente sur la fréquence de marche (gauche) et la taille des pas (droite). Plus que tout autre paramètre, la forme physique influence à court terme ces deux variables. L'augmentation ou la maintenance de la fréquence/longueur de pas chez les personnes traduit la tentative de maintenir une vitesse constante du centre de masse, et cela indépendamment de la pente.*

à diminuer simultanément la taille et la fréquence des pas de façon linéaire en fonction de la pente (corrélations variant de 0.41 à 0.89). Les deux personnes citées augmentent leur fréquence plus la montée est importante. En considérant la forme physique des gens, il ressort qu'en augmentant ou en maintenant soit la taille des enjambées, soit la cadence, ceux-ci cherchent à maintenir une vitesse constante sur tout le parcours.

Ces constatations vont quelque peu à l'encontre des conclusions formulées par Sun et al. (1996) sans pour autant confirmer celles de Finley et Cody (1970) quant à la marche en descente. Ces différences proviennent vraisemblablement des conditions d'expérimentation. Les tailles des pas furent, dans l'étude citée, calculées sur une distance de 9.4 m dans des situations particulières, alors que les tests réalisés sont effectués sans contraintes avec détermination continue des enjambées sur tout le parcours. Une diminution serait cependant explicable par les observations suivantes: lors d'une marche en descente, l'impact du talon sur le sol est plus à même de provoquer un glissement que le soulèvement des orteils du pieds arrière. Due à la composante du poids augmentant la force d'inertie, la nécessité de friction du talon avec le sol s'en trouve augmentée. Un raccourcissement des pas permettrait donc de diminuer cette demande de friction et, du même coup, les risques de glissement.

La forme physique semble donc beaucoup influencer, à court terme, la façon de marcher des gens en milieu vallonné. Cet indicateur étant difficile à estimer, le modèle de pas utilisé dans une telle situation sera celui de la marche en terrain plat. L'ascension ou la descente sera présente dans la modélisation de la vitesse 3D sur laquelle repose ce modèle. Le fait que la fréquence de pas diminue simultanément à leur taille confirme que, dans cette situation également, la relation (Eq. 2.7) est cohérente.

## 2.4 Distributions statistiques

Alors que bon nombre de phénomènes naturels sont distribués selon une loi normale, les différents paramètres liés à la marche semblent suivre une distribution moins usuelle. Il a été demandé à 11 personnes de marcher sur une distance de 100 m de manière lente, normale

et rapide. Les résultats obtenus montrent que pour chaque allure considérée, fréquence et taille de pas suivent une loi normale. Cette affirmation devient cependant fautive si l'on analyse individuellement la globalité des essais. En considérant une trajectoire comme la somme de segments sur lesquels l'allure est constante, on devrait théoriquement obtenir une distribution normale des paramètres.

Sur 287 tests réalisés par 27 personnes différentes dans des circonstances hétérogènes, 5 seulement montrent que la fréquence de marche ainsi que la taille des pas suivent une loi normale selon les tests de Kolmogorov-Smirnov et de Lilliefors. Aucun rythme ne fut imposé durant les parcours variant de 200 m à 7 km.

Selon les histogrammes observés, les lois varient en fonction de la durée et des spécificités du chemin effectué, Fig. 2.12. Se présentant comme une addition de lois normales à moyenne et écart-type variables, cette dernière apparaît comme la plus adaptée aux phénomènes de la marche sans contraintes. Malgré une similitude visuelle apparente pour chaque fréquence considérée séparément, l'addition peut, selon les cas, produire des distributions complexes, difficilement identifiables. Le but ne sera donc pas une modélisation de celles-ci mais une adaptation continue des paramètres de la loi normale à chaque fréquence.

La fonction de distribution dépend également du type d'activité de la personne. La dynamique de marche d'une randonnée ne comporte pas les mêmes caractéristiques qu'une marche en ville. Un rythme de marche constant, favorise des enjambées régulières pouvant être considérées comme une variation symétrique autour d'une valeur déterminée ( $\sim$  loi normale). Lors de situations plus pressantes ou plus étendues dans le temps, la taille des pas est plus changeante, privilégiant cependant certaines magnitudes individuelles. L'allure de la répartition n'est donc pas constante dans le temps mais en continuelle évolution. Pour la modélisation, la valeur de pas moyenne, influençant directement la valeur des paramètres de (Eq. 2.7), est mise à jour dès que les informations satellitaires sont disponibles.

## 2.5 Déplacements: 360° de liberté

La direction du mouvement correspond dans la grande majorité des cas à la direction du plan sagittal, cf Fig. 2.4. Toutefois, la marche arrière ainsi que les déplacements latéraux (pas chassés) peuvent survenir sans que l'orientation du bassin ou des épaules ne s'en trouve modifiée. Les capteurs de direction situés à ces endroits précis auront donc besoin d'une indication supplémentaire afin de corriger l'azimut mesuré en azimut de déplacement.

Cette caractérisation se réalisera en deux étapes. Dans un premier temps, on distinguera les mouvements avant-arrière des mouvements gauche-droite, pour, dans une seconde étape, discriminer ces derniers également. L'observation de l'agitation dans l'une et l'autre orientation (antéro-postérieure et latérale) fournit une information pertinente sur la direction générale de déplacement. En calculant les variances des signaux accélérométriques correspondant à chaque pas,  $var(s_{ap})$  et  $var(s_l)$ , le rapport  $\frac{var(s_{ap})}{var(s_l)}$  favorise la qualification robuste du type de mouvement. La définition de la direction s'effectue ensuite par la détection d'un motif caractéristique correspondant à une succession temporelle d'événements.

Ces enchaînements d'accélération peuvent être analysés soit en considérant une succession logique d'extrema locaux, soit en repérant directement les motifs dans leur intégralité. La Fig. 2.13 illustre les différents motifs présents dans le signal accélérométrique lors des situations mentionnées. Ceux-ci sont relativement symétriques si l'on considère les directions antéro-postérieure et latérale séparément. Par contre, le mouvement est différent entre

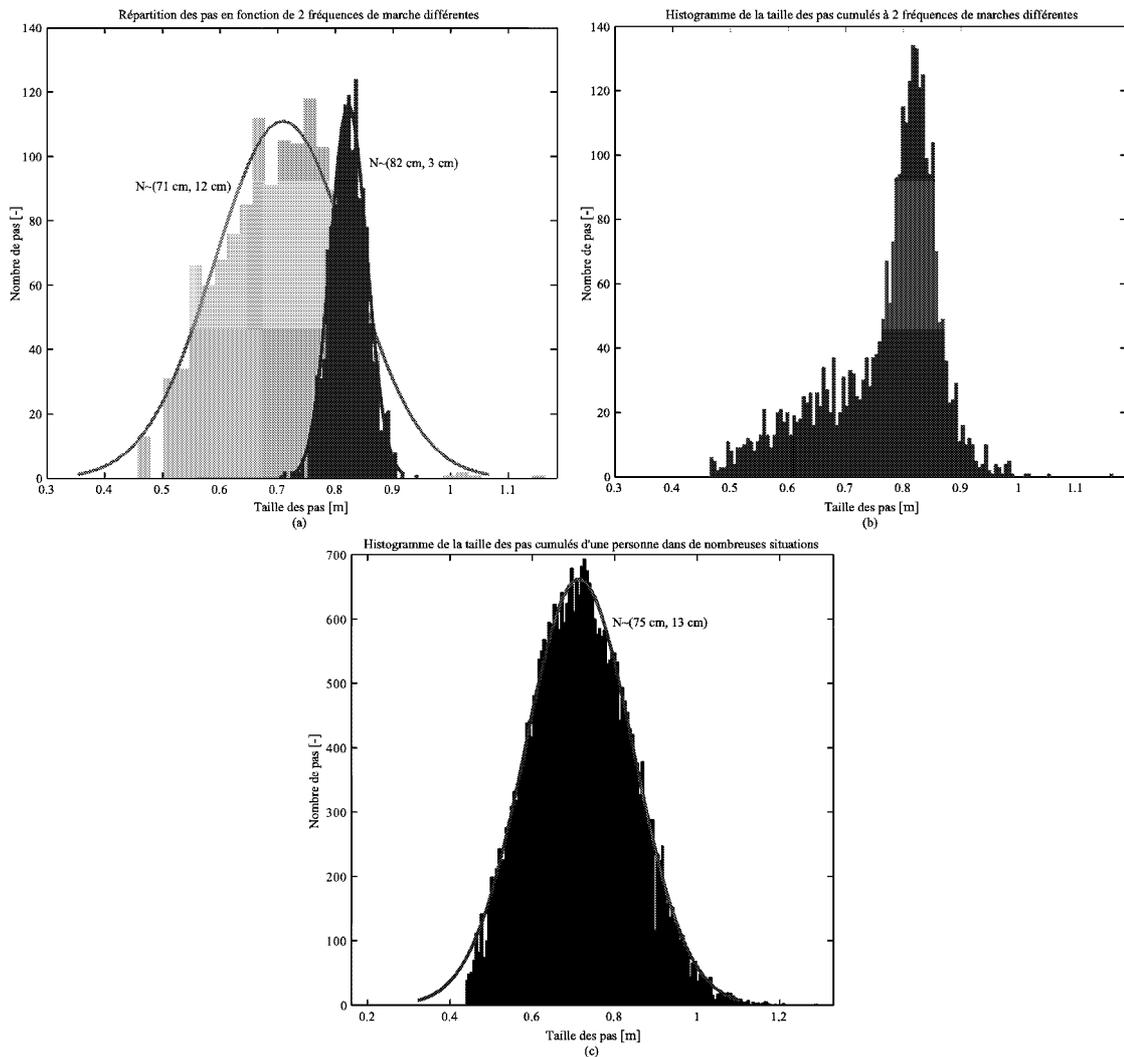


FIG. 2.12 – Évolution statistique des pas durant un parcours. (a) On remarque que pour des fréquences de marche plus ou moins constantes, la taille des pas suit une loi normale centrée à une valeur bien définie (tests Kolmogorov-Smirnov 95%). En accord avec Tab. 2.1 et selon le parcours effectué, différentes distributions plus ou moins complexes peuvent résulter de la superposition de ces lois normales (b). En (c) la répartition de 35'480 pas d'une même personne résultant de différents trajets dans des situations et à des fréquences variées. La distribution s'approche fortement d'une loi normale bien que le test soit rejeté. Le grand nombre de données considérées rendant l'intervalle de confiance toujours plus étroit explique vraisemblablement ce rejet.

ces deux directions. Lorsque l'on effectue un pas chassé, celui-ci peut être décomposé en 4 étapes, contre 3 dans une marche avant-arrière, Fig. 2.9. Pour un déplacement vers la droite, la personne se trouve en appui sur les deux pieds (1), elle étend la jambe droite latéralement, ce qui provoque une accélération dans le même sens (2) tout en abaissant le corps. Une fois le pied posé (3), le centre de gravité est arrêté dans sa chute et remonte lentement jusqu'à ce que la seconde jambe ait rejoint la première, translatant ce dernier (4) vers un nouveau double appui quasiment statique. Contrairement à la marche avant, deux élévations successives du centre de gravité ne donnent lieu qu'à une enjambée. Ces signatures individuelles peuvent être détectées par différentes méthodes temporelles ou fréquentielles.

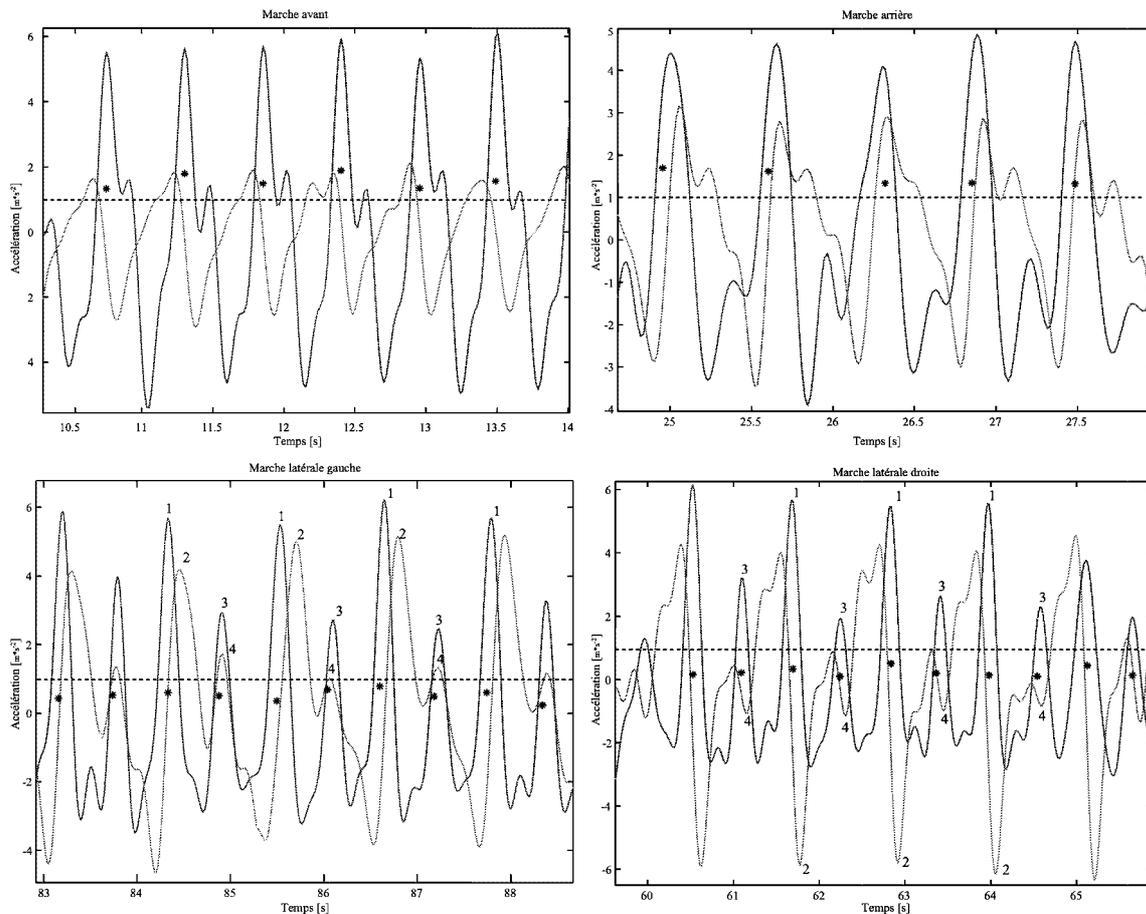


FIG. 2.13 – Motifs caractéristiques de la marche dans les 4 directions principales. Le signal foncé représente l'accélération verticale alors qu'en clair sont représentés les signaux antéro-postérieurs (haut) et latéraux (bas). Les «\*» sont les valeurs de l'indicateur  $\frac{var(s_{ap})}{var(s_l)}$  permettant de différencier les mouvements latéraux et antéro-postérieurs.

## 2.6 Personnes malvoyantes et aveugles

Lorsqu'une personne marche, son système nerveux enregistre et analyse en permanence un nombre important de paramètres. Le rôle de la vue permet de gérer par avance le contournement d'obstacles ainsi que d'adopter son style de marche à l'environnement. Privés de ce sens, les aveugles développent l'acuité de leurs sens restants afin de pallier à ce handicap. Dans le but de déterminer si les modèles utilisés pour des personnes voyantes sont également applicables chez des aveugles, des tests furent réalisés en milieu urbain et semi-urbains. Considérant certains travaux réalisés (Knutzen et al., 1985; Clark-Carter et al., 1987), il est important de mentionner que les aveugles n'étaient point guidés mais qu'ils évoluaient dans les conditions de leur vie quotidienne, se déplaçant à l'aide d'une canne.

Les résultats obtenus confirment la validité de l'approche adoptée tout en faisant ressortir les considérations suivantes.

### – Variabilité individuelle

Si, pour des personnes voyantes, chaque set de paramètres devrait être calibré individuellement, ceci est d'autant plus vrai pour les aveugles. Suivant l'habitude qu'a

un individu à se déplacer seul, la taille des pas ainsi que son allure se rapprochent des valeurs standard pour personnes voyantes. Une diminution de celles-ci traduira une certaine prudence, généralement liée à une marche plus saccadée et hésitante.

### – **Connaissance du trajet**

Selon une étude réalisée par Clark-Carter et al. (1981), 30% des aveugles ou mal-voyants ne sortaient pas de chez eux sans être accompagnés. S'il faut espérer que ce pourcentage ait diminué, rares sont les aveugles qui s'aventurent sur un parcours inconnu. Les déplacements ont lieu dans un premier temps avec un accompagnant jusqu'à ce que le trajet soit mémorisé. L'encombrement du trottoir ainsi que la concentration de personnes jouera un rôle imprévisible et important dans sa dynamique de marche.

De nombreux pièges tels que panneaux surélevés d'affichage, publicitaires ou présentoirs d'habits constituent autant d'occasions à la canne de s'engouffrer, impliquant une collision inévitable. Relativement aux modèles de marche, ces impacts sont la cause de déplacements latéraux et arrières fréquents, nécessaires pour le contournement de l'obstacle. Une occurrence latérale intercalée au milieu de deux mouvements antéro-postérieurs devra donc être considérée comme telle contrairement aux personnes ordinaires chez qui un tel enchaînement est statistiquement négligeable.

### – **Influence météorologique**

L'aveugle s'aidant principalement de l'ouïe pour se repérer et s'orienter, le vent, la neige et la pluie auront tendance à modifier son type de marche de par une perception différente de la distance aux phénomènes. Le vent ou la neige atténuant les sons, leur source apparaîtra comme plus éloignée, alors que la pluie aura un effet contraire. En présence de ces conditions, l'aveugle montrera une prudence supplémentaire justifiée dans ses mouvements.

### – **Observations statistiques**

Contrairement à certaines études considérant la vitesse de marche comme variable d'analyse principale (Nakamura, 1997), la fréquence des pas a été retenue ici, Tab. 2.3. La raison sous-jacente s'explique par une augmentation de celle-ci en cas de stress momentané (rencontre d'obstacle), n'occasionnant pas nécessairement une augmentation de vitesse. Vitesse et fréquence sont cependant corrélées et diminuent à mesure que la difficulté globale du parcours augmente. Il ressort également qu'à une diminution de fréquence coïncide une augmentation du spectre de mouvements observés. A nouveau, ceci peut s'expliquer par une insécurité et une augmentation de précaution dans le déplacement.

En définissant une fréquence de marche optimale individuelle, par analogie avec Clark-Carter et al. (1986), il est donc possible d'avoir une indication sur le type de parcours rencontré ainsi que du niveau de confiance de la personne.

## Bibliographie

Aminian, K., Robert, P., Jéquier, E., et Schutz, Y. (1995). Incline, speed, and distance assessment during unconstrained walking. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, pages 226–234.

Antonsson, E. K. et Mann, R. W. (1995). The frequency content of gait. *J. Biomechanics*, 18(1):39–47.

		Semi-Urbain	Urbain
<b>Personne voyante</b>	f	1.78	1.85
	$s_0$	0.06	0.09
<b>1<sup>er</sup> aveugle</b>	f	1.52	1.59
	$s_0$	0.12	0.20
<b>2<sup>ème</sup> aveugle</b>	f	1.70	1.81
	$s_0$	0.08	0.24
<b>3<sup>ème</sup> aveugle</b>	f	1.66	1.72
	$s_0$	0.11	0.17

TAB. 2.3 – Comparaison entre les fréquences de pas mesurées lors de parcours libre en zone résidentielle et en ville. On a décrit oralement le parcours aux aveugles; ceux-ci connaissent la région mais n'empruntent pas régulièrement ce trajet. La personne voyante est représentative d'un échantillon de 13 personnes ayant participé aux tests. La fréquence de pas est toujours inférieure chez les aveugles alors que la variation, elle, est supérieure. Ceci s'explique par une plus grande prudence, par des hésitations en zones peu familières ainsi qu'à des réactions spontanées (piétinement ou replis) lors d'obstacles heurtés. Ces derniers augmentant en zone urbaine, l'aveugle a tendance à augmenter sa fréquence de pas aux dépens de leur taille. Ceci lui permet de maintenir une allure normale avec un temps de réaction court face à tout imprévu.

Bruton, A. M., Glennie, C. L., et Schwarz, K. P. (1999). High precision GPS velocity and acceleration determination. *GPS Solutions*, 2(4):7–21.

Capozzo, A., Leo, T., et Pedotti, A. (1975). A general computing method for the analysis of human locomotion. *J. Biomechanics*, 8:307–320.

Cavagna, G. A. (1969). Travail mécanique dans la marche et la course. *J. Physiol.*, 61:3–42.

Cavagna, G. A. et Franzetti, P. (1986). The determinants of the step frequency in walking in humans. *J. Physiol.*, 373:235–242.

Cavagna, G. A., Willems, P., et Heglund, N. C. (2000). The role of gravity in human walking: pendular energy exchange, external work and optimal speed. *Journal of Physiology*, 528:657–668.

Clark-Carter, D. C., Heyes, A. D., et Howarth, C. I. (1986). The efficiency and walking speed of visually impaired people. *Ergonomics*, 29(6):779–789.

Clark-Carter, D. C., Heyes, A. D., et Howarth, C. I. (1987). The gait of visually impaired pedestrian. *Human Movement Science*, 6:277–282.

Clark-Carter, D. C., Howarth, C. I., Heyes, A. D., Dodds, D., et Armstrong, J. D. (1981). The visually handicapped in the city of nottingham: a survey of their disabilities, mobility, employment and daily living skills. Technical report, Blind Mobility Research Unit, University of Nottingham.

Finley, F. R. et Cody, K. A. (1970). Locomotive characteristics of urban pedestrians. *Archives of Physical Medicine & Rehabilitation*, 51:423–426.

Gabaglio, V. (2002). *GPS/INS System Integration for Low-Dynamic Application*. PhD thesis, Ecole Polytechnique Fédérale Lausanne (EPFL).

Gabaglio, V. et Merminod, B. (2000). Using satellite positioning system and inertial sensors for pedestrian navigation. In *Proc GNSS2000*.

Hayfron-Acquah, J. B., Nixon, M. S., et Carter, J. N. (2001). Automatic gait recognition by symmetry analysis. In *Proc Audio-and-Video-Based Biometric Person Authentication*, pages 272–277.

- Hirokawa, S. et Matsumara, K. (1987). Gait analysis using a measuring walkway for temporal and distance factors. *Med Biol Eng Comp*, 25:577–582.
- Kaneko, M., Matsumoto, M., Ito, A., et Fuchimoto, T. (1987). Optimum step frequency in constant speed running. *Biomechanics X-B*, 6:803–807.
- Knutzen, K., Hamill, J., et Bates, B. (1985). Ambulatory characteristics of the visually disabled. *Human Movement Science 4*, pages 55–66.
- Ladetto, Q. (2000). On foot navigation: Continuous step calibration using both complementary recursive prediction and adaptive kalman filtering. In *Proc. ION GPS-2000*, pages 1735–1740, Salt Lake City, Utah, USA.
- Ladetto, Q., Merminod, B., Terrier, P., et Schutz, Y. (1999). On foot navigation: When GPS alone is not enough. In *GNSS99*, pages 443–449, Genova, It.
- Little, J. J. et Boyd, J. E. (1998). Recognizing people by their gait: The shape of motion. *Videre: Journal of Computer Vision Research*, 1(2):2–32.
- Margaria, R. (1976). *Biomechanics and energetics of muscular exercise*. Clarendon Press, Oxford.
- Margaria, R., Aghemo, P., et Rovelli, E. (1966). La lunghezza dei passi in funzione della velocità nella marcia e nella corsa. *Rend. Acc. Naz. dei Lincei, Class. Sci. Fis. mat. e Nat.*, 40(8):194–200.
- Murray, M. P. (1967). Gait as a total pattern of movement. *American Journal of Physical Medicine*, 46(1):290–333.
- Murray, M. P., Mollinger, L. A., Gardner, G. M., et Sepic, S. B. (1984). Kinematic and EMG patterns during slow, free and fast walking. *Journal of Orthopaedic Research*, 2:272–280.
- Nakamura, T. (1997). Quantitative analysis of gait in the visually impaired. *Disability and Rehabilitation*, 19(5):194–197.
- Nixon, M. S., Carter, J. N., Nash, J. M., Huang, P. S., Cunado, D., et Stevenage, S. V. (1999). Automatic gait recognition. In *Proc IEE Colloquium "Motion Analysis and Tracking*, pages 3/1–3/6.
- Perrin, O., Terrier, P., Ladetto, Q., Merminod, B., et Schutz, Y. (2000). Improvement of walking speed prediction by accelerometry using altimetry, validated by DGPS. *Med & Biol Eng & Comp*, 38:164–168.
- Rosenrot, P., Wall, J., et Charteris, J. (1980). The relationship between velocity, stride time, support time and swing time during normal walking. *Journal of Human Movement Studies*, 6:323–335.
- Shannon, C. E. (1949). Communication in the presence of noise. In *Proc. IRE*, number 37, pages 10–21.
- Sun, J., Walters, M., Svensson, N., et Lloyd, D. (1996). The influence of surface slope on human gait characteristics: a study of urban pedestrians walking on an inclined surface. *Ergonomics*, 39(4):677–692.
- Wall, J. C., Nottrodt, J. W., et Charteris, J. (1981). The effects of uphill and downhill walking on pelvic oscillations in the transverse plane. *Ergonomics*, 24(10):807–816.
- Winter, D. A. (1979). *Biomechanics of human movement*. John Wiley & Sons.



## Chapitre 3

# Mesures et modèles

*Au moment de prendre une décision  
de quelque importance, quelle qu'elle soit,  
trouve l'expert en la matière,  
et fait ce qu'il te dira de faire.*

Contes des mille et une nuits

Afin de déterminer le déplacement d'une personne et d'être à même de décrire sa trajectoire, la mesure et la modélisation de divers phénomènes physiques sont nécessaires. Les différents thèmes abordés dans ce chapitre ne représentent pas l'intégralité des méthodes de localisation possibles, mais uniquement celles retenues pour leur pertinence quant aux applications considérées.

### 3.1 Le champ magnétique terrestre

La Terre, comme d'autres planètes du système solaire (Saturne, Uranus, Mars, ...), se caractérise par l'existence d'un champ magnétique qui s'est maintenu dans le temps. Les conséquences géologiques de ce champ sont considérables du fait de sa fossilisation par certaines roches.

L'origine de l'essentiel du champ magnétique est lié aux mouvements du fluide conducteur du noyau interne composé essentiellement de fer (Fe) et de nickel (Ni). Ceux-ci sont engendrés par convection thermique et par la rotation de la Terre créant des courants électriques, et donnant ainsi naissance à un champ magnétique induit. Ce phénomène est connu sous le nom de géodynamo. Le champ d'induction, dit également champ de Gauss, est identique à celui d'un dipôle centré. Il est possible de définir alors deux pôles géomagnétiques (pôles de Gauss) et un plan dans lequel l'angle que fait le vecteur du champ magnétique par rapport à ce plan horizontal est nul. Ce plan s'appelle l'*équateur magnétique* et l'angle mentionné est connu sous le nom d'*inclinaison*. Il existe plusieurs types

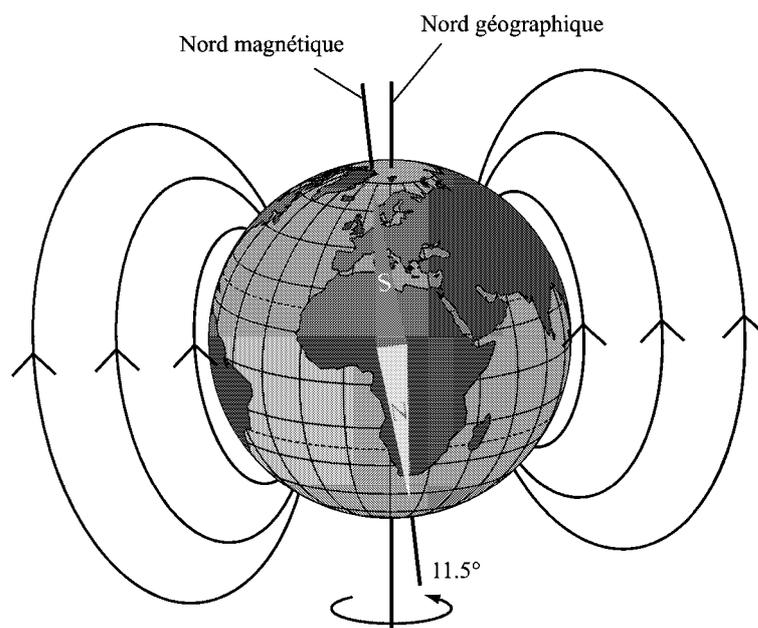


FIG. 3.1 – Le champ magnétique terrestre varie de 33'000 nT à 70'000 nT en fonction du lieu. Le champ terrestre pointe vers le haut dans l'hémisphère Sud et vers le bas dans l'hémisphère Nord. Le pôle magnétique ne coïncide pas avec le pôle géographique mais forme un angle de 11.5° avec l'axe de rotation terrestre.

de pôles magnétiques dont notamment le pôle *mesuré* ainsi que celui *modélisé*. Le premier est déterminé sur le terrain comme l'endroit où l'inclinaison est égale à 90°. Cette tâche n'est pas évidente car les étendues où l'inclinaison est plus ou moins maximale sont importantes. Les orages magnétiques superposés aux variations journalières ajoutent encore à la difficulté. Une campagne effectuée en 1990 a déterminé le pôle magnétique Nord à 103.4° Ouest et 78.5° Nord et le pôle sud à 139° Est et 65° Sud. La modélisation conduit à des positions sensiblement différentes, variant avec les données utilisées et avec le temps.

Une troisième manière de représenter le Nord est l'endroit où le dipôle coupe la surface de la Terre. Si l'on choisit comme référentiel le système de coordonnées géographiques, le pôle de Gauss situé dans l'hémisphère Nord, et de polarité magnétique Sud, aura les coordonnées suivantes: 71.5° Ouest et 78.5° Nord. Le pôle de Gauss Sud est situé aux antipodes: 108.5° Est et 78.5° Sud. Ces pôles magnétiques ne sont pas fixes dans le temps et l'espace, mais se déplacent en fonction des ré-arrangements massiques du noyau terrestre. Les lignes du champ magnétique vont du pôle Nord au pôle sud, comme celles du champ électrique vont d'une charge positive à une charge négative. Comme les pôles également s'attirent et se repoussent, le pôle Nord d'un aimant sera attiré vers le pôle sud terrestre. Cette inversion a une anecdote historique concernant la représentation graphique des pôles. Les compas utilisés dans la marine avaient généralement une extrémité bleue et une rouge. Le rouge indiquant le Nord et le bleu le sud, le pôle Nord géographique est depuis ce moment toujours représenté en bleu. L'unité de mesure du champ magnétique est le tesla (T). Les valeurs du champ terrestre étant faibles, on emploie plus facilement le nT ( $10^{-9}$ ), appelé autrefois g (le Gauss). La valeur maximale du champ se rencontre au pôle magnétique sud (70'000 nT) alors que la valeur minimale se rencontre près de l'équateur (33'000 nT). L'axe principal reliant les deux pôles de Gauss présente un angle de 11.5° avec l'axe de rotation terrestre. Les pôles Nord magnétique et géographique ne sont donc pas confondus. Ces

différentes considérations sont présentées à la Fig. 3.1.

A ce champ dipolaire se superpose un champ non dipôle représentant environ 10% du champ total. Soumises à l'action d'un champ magnétique, la majorité des substances deviennent elle-mêmes magnétiques: elles acquièrent une aimantation. Cette dernière varie avec la structure et les propriétés des différents corps. Lorsque des roches riches en corps ferromagnétiques se mettent en place, non seulement elles fossilisent le champ existant, mais de plus leur aimantation va s'ajouter à la valeur du champ moyen actuel, créant une anomalie magnétique positive. A l'inverse, de grandes épaisseurs de roches sédimentaires ou des dômes de sel qui ne s'aimantent pas peuvent créer des anomalies négatives locales.

### 3.1.1 Le vecteur magnétique terrestre

Afin de déterminer différentes valeurs utiles à la navigation, une représentation tri-dimensionnelle du vecteur magnétique est nécessaire, Fig. 3.2. Ses composantes peuvent se décrire de la manière suivante.

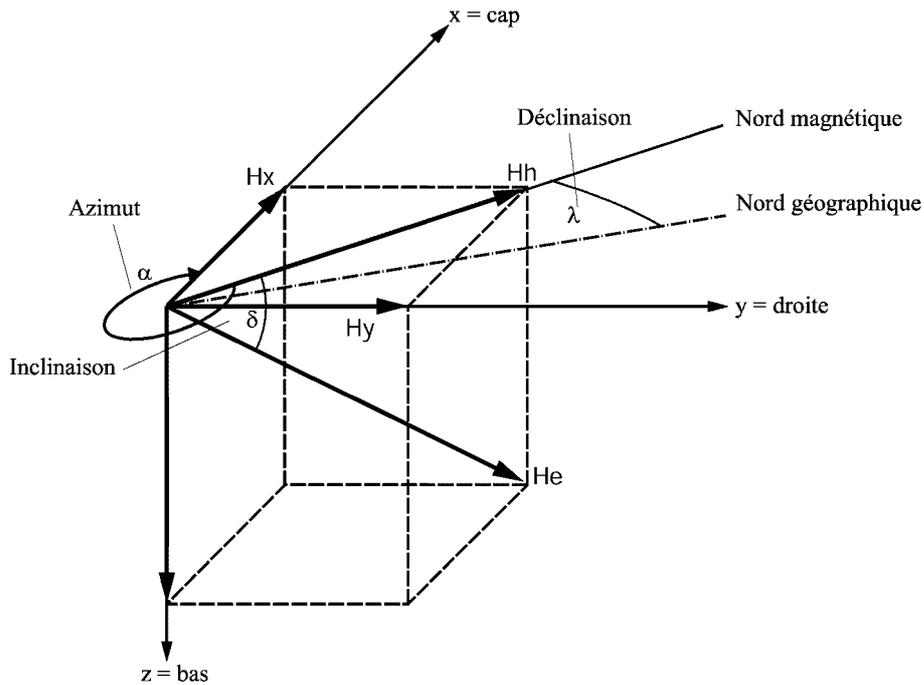


FIG. 3.2 – Représentation du vecteur magnétique terrestre dans l'hémisphère Nord.

$$H_e = H_H \begin{bmatrix} \cos(\alpha) \\ -\sin(\alpha) \\ \tan(\delta) \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

L'*azimut*  $\alpha$  est l'angle entre le Nord magnétique et la direction de déplacement. Le Nord magnétique est la direction de la composante horizontale du champ terrestre, c'est à

dire la composante perpendiculaire à la gravité.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{-H_y}{H_x}\right) \tag{3.2}$$

L'azimut est compté positif dans le sens des aiguilles d'une montre depuis le Nord magnétique, i.e. Nord: 0° ou 360°, Est: 90°, etc.

L'*inclinaison*,  $\delta$ , comme mentionné précédemment est l'angle que fait le vecteur magnétique avec l'horizontale.  $\delta$  varie de 0 à 90° et est compté positivement si le vecteur pointe vers le sol (inclinaison boréale).

La *déclinaison*,  $\lambda$ , est l'angle compris entre le Nord magnétique et géographique. Celui-ci dépend non seulement de la position sur la Terre, mais il varie également avec le temps. La déclinaison peut être dirigée vers l'Est ou l'Ouest et atteindre des valeurs de l'ordre de  $\pm 25^\circ$ . Une déclinaison Est signifie que le Nord magnétique indiqué par le compas se trouve à l'Est du Nord géographique. Il faut donc soustraire cette valeur pour obtenir l'azimut correct. Un moyen mnémotechnique aisé adopté par les personnes de langue anglo-saxonne existe pour le signe de la correction:

Declination West - Compass Best (meilleur = addition)  
Declination East - Compass Least (moindre = soustraction)

### 3.1.2 Attitude

Jusqu'à présent, toutes les variables déduites l'ont été avec la supposition que l'instrument mesurant les différents phénomènes se trouvait à niveau, sur un plan horizontal. Or ceci, dans la réalité, est rarement, pour ne pas dire jamais, vrai. En plus de l'inclinaison, il faudra donc déterminer l'attitude du capteur afin d'en déduire les différents angles de projection. Le tangage et le roulis vont jouer une influence directe sur la détermination

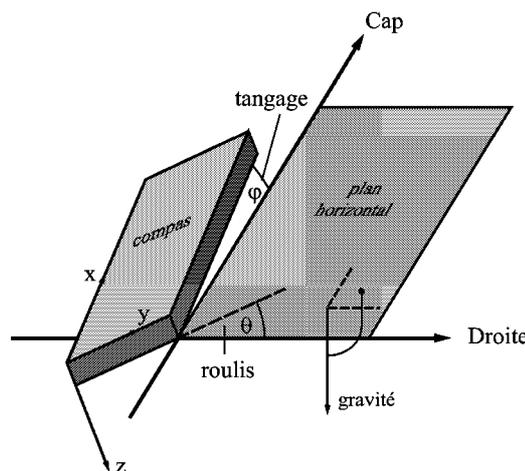


FIG. 3.3 – Représentation des angles de tangage et de roulis définissant, avec le cap, l'attitude du senseur. Les angles sont comptés positivement dans le sens trigonométrique.

de l'azimut, comme montré à la Fig. 3.3. Ces différents angles sont calculés en considérant les nouvelles coordonnées du vecteur gravité, jusqu'ici exprimé dans le référentiel du

compas, dans le référentiel local NED (Nord, Est, Down) tangent à la surface de la Terre. Cette transformation sera décrite en utilisant les angles d'Euler (Cap, Tangage, Roulis - CTR) qui permettent une succession de rotations autour de chaque axe. Les rotations sont considérées positives si elles sont effectuées dans le sens trigonométrique.

1. **Cap/Azimet** : rotation  $\psi$  autour de l'axe  $z$  afin d'être parallèle à l'axe du roulis. Le cap est mesuré positivement dans le sens des aiguilles d'un montre depuis le Nord.
2. **Tangage** : rotation  $\varphi$  autour de l'axe  $y$  afin de ramener l'axe du roulis à l'élévation voulue. Le tangage est mesuré positivement en se dirigeant vers le haut depuis le plan horizontal.
3. **Roulis** : rotation  $\theta$  autour de l'axe  $x$  visant à ramener le senseur dans son orientation spécifique.

La séquence complète de rotations afin de passer des coordonnées CTR en coordonnées NED est la suivante.

$$\mathbf{R}_{\text{NED}}^{\text{CTR}} = \overbrace{\begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}^{\text{Cap}} \overbrace{\begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix}}^{\text{Tangage}} \overbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}}^{\text{Roulis}} \quad (3.3)$$

$$\begin{pmatrix} \cos \psi \cdot \cos \varphi & -\sin \psi \cdot \cos \theta + \cos \psi \cdot \sin \varphi \cdot \sin \theta & \sin \psi \cdot \sin \theta + \cos \psi \cdot \sin \varphi \cdot \cos \theta \\ \sin \psi \cdot \cos \varphi & \cos \psi \cdot \cos \theta + \sin \psi \cdot \sin \varphi \cdot \sin \theta & -\cos \psi \cdot \sin \theta + \sin \psi \cdot \sin \varphi \cdot \cos \theta \\ -\sin \psi & \cos \varphi \cdot \sin \theta & \cos \varphi \cdot \cos \theta \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

Dans le cas particulier du compas, seuls le tangage et le roulis sont appliqués puisque le cap est le paramètre d'intérêt. Comme l'unique force agissant sur le capteur au repos est la gravité, le système d'équations devient:

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \mathbf{R}_\varphi \cdot \mathbf{R}_\theta \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot g = \begin{bmatrix} -\sin \varphi \\ -\sin \theta \cdot \cos \varphi \\ \cos \theta \cdot \cos \varphi \end{bmatrix} \cdot g \quad (3.5)$$

où  $a_x$ ,  $a_y$  et  $a_z$  sont les accélérations mesurées par le capteur dans le système de coordonnées CTR. On obtient par relation trigonométrique  $\varphi = \arcsin(-a_x)$  et  $\theta = \arctan(\frac{-a_y}{a_z})$ .

Connaissant le tangage et le roulis, le champ magnétique terrestre peut être projeté sur le plan horizontal afin de déduire l'azimet de déplacement. Il est judicieux de mentionner ici que si  $\mathbf{R}_\varphi \cdot \mathbf{R}_\theta$  permet le passage du système NED  $\rightarrow$  CTR, sa transposée  $(\mathbf{R}_\varphi \cdot \mathbf{R}_\theta)^T$ , permet d'effectuer la transformation inverse.

$$H_x = b_x \cdot \cos \varphi + b_y \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi + b_z \cdot \cos \theta \cdot \sin \varphi \quad (3.6)$$

$$H_y = b_y \cdot \cos \theta - b_z \cdot \sin \theta \quad (3.7)$$

$$H_z = -b_x \cdot \sin \varphi - b_y \cdot \cos \theta \cdot \sin \varphi + b_z \cdot \cos \theta \cdot \cos \varphi \quad (3.8)$$

$b_x$ ,  $b_y$  et  $b_z$  sont les composantes du champ magnétique dans le système CTR, i.e. mesuré par le compas. L'azimut de déplacement est ensuite calculé par la formule (Eq. 3.2).

### 3.1.3 Défaut d'horizontalité

Jusqu'à maintenant, l'hypothèse que l'attitude du senseur est exactement connue a été retenue. Ceci n'est bien entendu pas toujours vérifié et des erreurs sur les angles de tangage et de roulis sont à considérer. Il en résulte l'apparition d'une composante magnétique additionnelle dans le plan horizontal. Une erreur sur l'angle de tangage provoquera une composante dans l'axe du roulis et réciproquement. La description théorique complète peut être trouvée dans Denne (1979). La dérivation mathématique de l'erreur d'azimut avec un développement de Taylor de premier ordre est la suivante:

$$\alpha + \Delta\alpha = \arctan\left(\frac{-H_y}{H_x}\right) + \frac{\partial\left(\arctan\left(\frac{-H_y}{H_x}\right)\right)}{\partial H_y} \Delta H_y + \frac{\partial\left(\arctan\left(\frac{-H_y}{H_x}\right)\right)}{\partial H_x} \Delta H_x \quad (3.9)$$

En simplifiant les expressions nous obtenons,

$$\Delta\alpha = \frac{H_y \Delta H_x - H_x \Delta H_y}{H_x^2 + H_y^2} \quad (3.10)$$

L'utilisation de la relation (Eq. 3.1) ainsi que quelques manipulations trigonométriques permettent d'écrire:

$$\Delta\alpha = -\Delta\theta \cdot \tan \delta \cdot \cos \alpha - \Delta\varphi \cdot \tan \delta \cdot \sin \alpha \quad (3.11)$$

La relation fait intervenir directement l'azimut de déplacement ainsi que l'inclinaison. Une même erreur aura donc des effets différents selon la latitude et l'orientation du senseur. La dépendance avec l'inclinaison vient du fait que plus le champ magnétique horizontal mesurable est faible (latitudes élevées), plus la composante additionnelle influencera l'azimut calculé. Cette erreur est connue en topométrie classique (Howald, 1990) par les personnes utilisant un théodolite sous le nom de *Erreur de verticalité de l'axe principal*. La dérivation mathématique s'effectue grâce à la trigonométrie sphérique, Fig. 3.4.

L'erreur de direction horizontale, ici l'azimut, est l'arc  $IE = \varepsilon_\theta$ . Il découle alors que

$$\frac{\sin \varepsilon_\theta}{\sin \psi} = \frac{\sin \delta}{\sin \frac{\pi}{2}}$$

et

$$\frac{\sin \psi}{\sin \theta} = \frac{\sin \alpha}{\sin \frac{\pi}{2} - \delta}$$

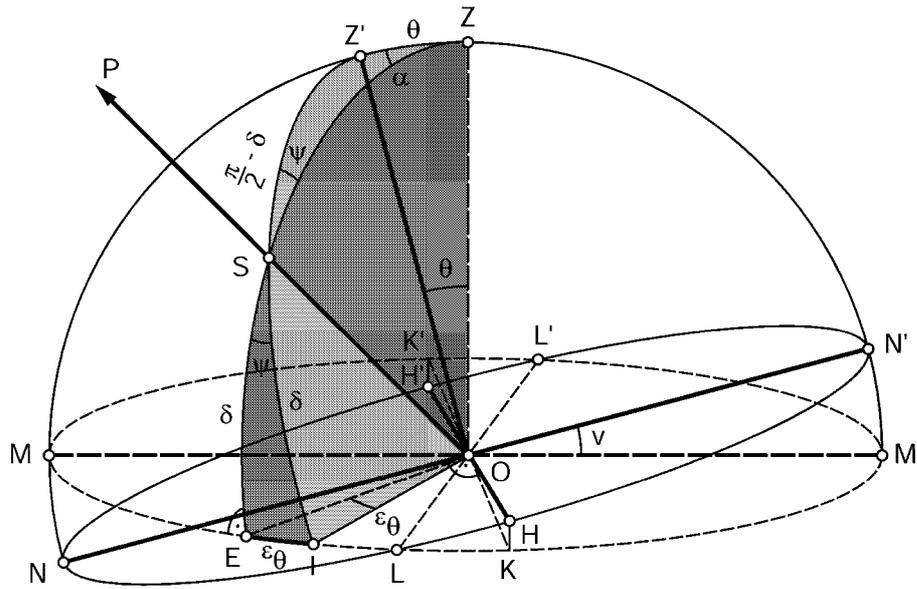


FIG. 3.4 – Erreur de verticalité de l'axe principal d'un théodolite. L'erreur sur une direction, due à un défaut de verticalité de l'axe principal, (ici, correspondant à un défaut d'attitude), dépend de l'orientation de la visée (ici, azimuth) et est proportionnelle à la tangente de l'angle de hauteur (ici inclinaison), adapté de Howald (1990)

d'où

$$\sin \varepsilon_{\theta} = \sin \theta \cdot \sin \alpha \cdot \tan \delta$$

Comme les angles  $\theta$  et  $\varepsilon_{\theta}$  sont petits, l'équation peut s'écrire de la manière suivante:  $\varepsilon_{\theta} = \theta \cdot \sin \alpha \cdot \tan \delta$ , ce qui est bien l'erreur d'azimut occasionnée par un erreur de roulis, comme trouvé à l'équation (Eq. 3.11). L'erreur causée par le tangage se déduit de façon similaire.

### 3.1.4 Perturbations magnétiques

Lorsque le module est porté par une personne, au champ magnétique terrestre se superposent des champs magnétiques parasites, Fig. 3.5. Si aucune compensation appropriée n'est effectuée, l'azimut calculé peut être dégradé de manière significative. Aussi sophistiquée que soit la compensation, elle ne peut corriger que les erreurs causées par des sources déterministes. Par déterministe on entend une source dont la position relative au compas est fixe aussi bien dans l'espace que dans le temps. Le champ magnétique autour d'une personne ne pourra donc être compensé que pour les objets qu'elle porte sur elle tels que ceinture, téléphone portable, casque, harnais, ... Heureusement, l'influence d'un champ parasite est inversement proportionnelle au carré, voire au cube, de la distance à la source. Un minimum d'attention peut donc réduire les perturbation de manière significative.

Si l'on pivote le compas de  $360^{\circ}$  dans un milieu sans aucune perturbation magnétique, la forme que l'on obtient en représentant la composante  $H_x$  vis-à-vis de  $H_y$  est un cercle. Ceci s'explique aisément par le fait que l'amplitude du champ doit demeurer constante

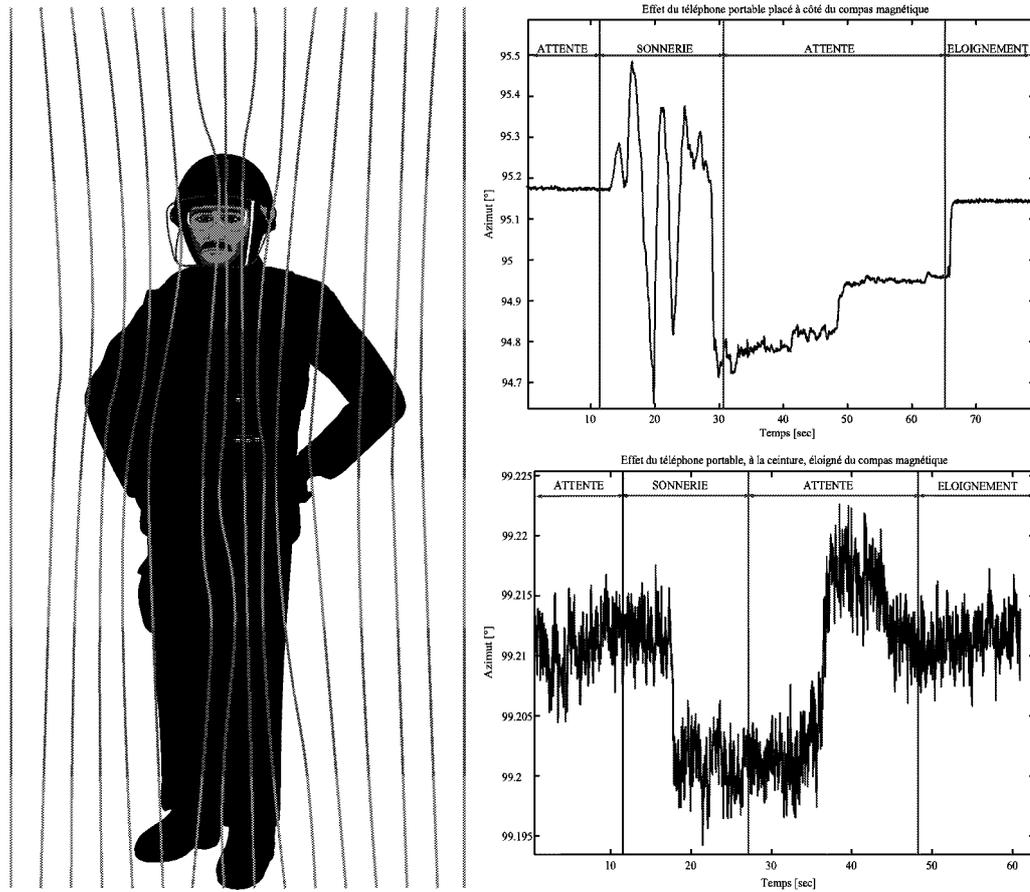


FIG. 3.5 – Perturbations magnétiques créées par une personne et devant être compensées avant tout calcul d'azimut (gauche). Les perturbations causées par un téléphone portable sont de l'ordre d'un degré si l'appareil se trouve juxtaposé au compas magnétique. En prenant des précautions minimales de distance, les perturbations disparaissent complètement, noyées dans la résolution des magnétomètres.

indépendamment de l'orientation du capteur. On classe les perturbations en deux catégories: les perturbations magnétiques *douces et fortes*. Les premières sont causées par des matériaux ferreux et ont une influence directionnelle sur le champ terrestre. Le cercle mentionné précédemment sera donc déformé en une ellipse. Les perturbations fortes, elles, sont causées par des objets magnétiques tels que des aimants ou des lignes électriques. Le champ créé vient s'ajouter de façon homogène au champ terrestre occasionnant un déplacement du centre du cercle de compensation, Fig. 3.6.

Le champ magnétique terrestre subit donc une rotation suivi d'une translation par rapport à sa direction originale. Mathématiquement, et dans les 3 directions de l'espace, cela se traduit de la manière suivante:

$$\begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{ex} \\ H_{ey} \\ H_{ez} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta m_{xx} & \Delta m_{xy} & \Delta m_{xz} \\ \Delta m_{yx} & \Delta m_{yy} & \Delta m_{yz} \\ \Delta m_{zx} & \Delta m_{zy} & \Delta m_{zz} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} H_{ex} \\ H_{ey} \\ H_{ez} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_{x0} \\ H_{y0} \\ H_{z0} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Bien que cette équation 3-D soit rigoureusement correcte, elle requiert la détermination indépendante de 12 paramètres, impliquant de ce fait des mesures à des angles d'inclinaisons

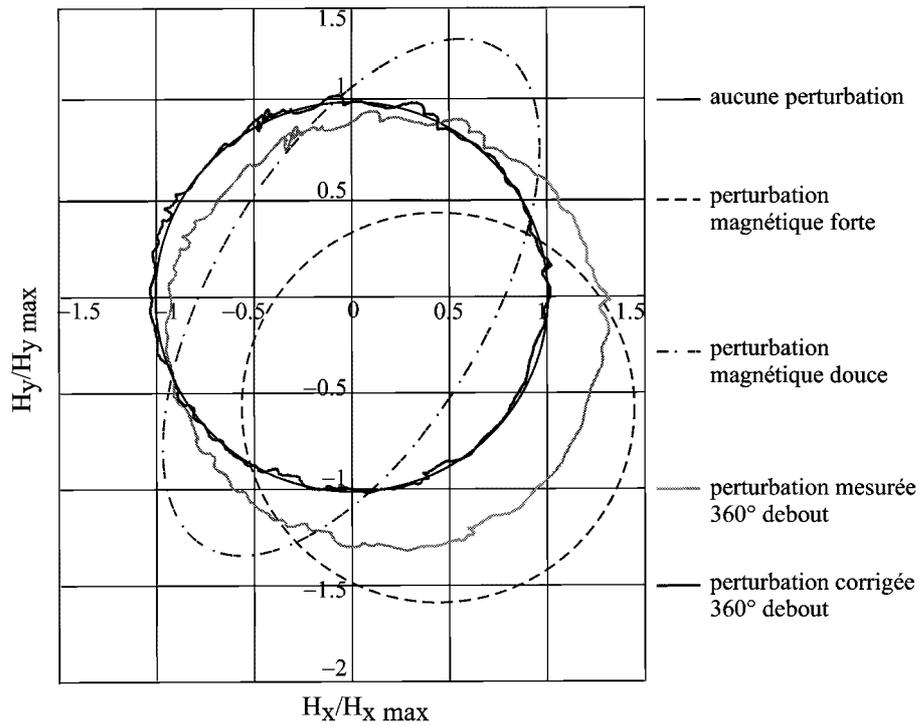


FIG. 3.6 – Représentation des effets sur le champ magnétique terrestre des deux types de perturbations magnétiques douce et forte.

différentes. Le plus souvent, une fois le compas placé sur la personne, un tel calibrage se révèle peu aisé. Une approche simplifiée est de considérer uniquement les composantes projetées dans le plan horizontal et de transformer l'ellipse obtenue en un cercle (Caruso, 1997, 2000; Stork, 2000). Les paramètres à déterminer (4) se composent de deux facteurs d'échelle  $X_{fe}$  et  $Y_{fe}$  ainsi que de deux déplacements  $X_0$  et  $Y_0$ . La procédure à suivre est la suivante.

- Trouver les valeurs maximale et minimale du champ magnétique selon les axes X et Y.
- Calcul des différents paramètres:

$$X_{fe} = 1 \text{ ou } (H_{Y_{max}} - H_{Y_{min}})/(H_{X_{max}} - H_{X_{min}}) \text{ si supérieur à } 1$$

$$Y_{fe} = 1 \text{ ou } (H_{X_{max}} - H_{X_{min}})/(H_{Y_{max}} - H_{Y_{min}}) \text{ si supérieur à } 1$$

$$X_0 = [(H_{X_{max}} - H_{X_{min}})/2 - H_{X_{max}}] \cdot X_{fe}$$

$$Y_0 = [(H_{Y_{max}} - H_{Y_{min}})/2 - H_{Y_{max}}] \cdot Y_{fe}$$

- Appliquer les corrections à chaque composante  $H_{X_{mes}}$  et  $H_{Y_{mes}}$  du champ magnétique, une fois que celles-ci ont été projetées dans le plan horizontal.

$$H_x = X_{fe} \cdot H_{X_{mes}} + X_0 \quad H_y = Y_{fe} \cdot H_{Y_{mes}} + Y_0 \quad (3.13)$$

Le calcul de l'azimut s'effectue ensuite en appliquant la formule (Eq. 3.2). De par le type d'applications considérées et la variabilité des perturbations rencontrées, un calibrage plus sophistiqué n'a pas été retenu. Les différents essais réalisés ont montré que la dynamique du signal mesuré est telle que cette simplification joue un rôle mineur au vu des spécificités

du filtrage de l'azimut de déplacement.

## 3.2 Senseur inertiel

Les gyroscopes sont, dans la navigation maritime et aéronautique, les capteurs inertiels par excellence.

### 3.2.1 Mesure de vitesses angulaires: le gyroscope

A partir de systèmes en rotation exploitant la conservation du moment d'inertie, la technologie a rapidement évolué, principalement vers des systèmes vibrants (mesure de la force de Coriolis), et optiques (mesure de l'effet Sagnac). La taille des gyroscopes a diminué simultanément et le passage de plate-formes inertiels à des systèmes de navigation liés (strapdown) s'est généralisé (Britting, 1971; Lawrence, 1993; Titterton et Weston, 1997). L'utilisation de gyroscopes pour la mesure d'azimut dans la navigation pédestre a été couverte de manière fort exhaustive dans Gabaglio (2002). Sa complémentarité au compas magnétique permet d'augmenter la fiabilité et la précision de ce dernier, Tab. 3.1. L'intégration des mesures gyroscopiques a ici un rôle autre que celui de fournir une direction de déplacement. Son but premier sera de stabiliser l'azimut magnétique lors de passages dans des zones perturbées. Une comparaison continue des changements d'azimuts permet de détecter de telles situations (Ladetto et al., 2001). Dans une deuxième phase, la détection de mouvements particuliers tels que des virages brusques est plus robuste lors de l'analyse des vitesses angulaires. La détermination de l'azimut de déplacement par un gyroscope

	Avantages	Inconvénients
<b>Compas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- azimut absolu</li> <li>- très bonne précision à long terme</li> <li>- reproductibilité des mesures (indépendance avec le temps)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- sensibilité aux perturbations magnétiques</li> </ul>
<b>Gyroscope</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- insensibilité aux perturbations magnétiques</li> <li>- très bonne précision à court terme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- dérive</li> <li>- azimut relatif</li> </ul>

TAB. 3.1 – Complémentarité du gyroscope et du compas magnétique. Les désavantages de l'un sont compensés par les avantages de l'autre.

autour de l'axe  $z$  diffère quelque peu de celle réalisée par un compas magnétique. De par la mesure de vitesses angulaires, le calcul de la direction suivie nécessite une intégration temporelle continue. A l'inverse du compas, l'initialisation de l'angle sur un azimut connu est indispensable à toute navigation absolue. Cette étape essentielle peut être réalisée grâce à des mesures satellitaires, un azimut magnétique ou simplement un tronçon orienté.

### 3.2.2 Erreurs internes aux gyroscopes

Différentes sources d'erreurs du senseur sont à prendre en considération pour une modélisation optimale des vitesses angulaires. Les principales sont Fig. 3.7:

1. le **biais**, égal à la valeur de signal lorsque le senseur est au repos.
2. le **facteur d'échelle**, résultant souvent d'un vieillissement ou de tolérances du capteur.
3. la **non linéarité** de la réponse.

D'autres erreurs telles qu'une asymétrie du facteur d'échelle, une zone morte de mesures ou un défaut de résolution peuvent également survenir. A l'exception du biais et du facteur d'échelle, les erreurs additionnelles sont généralement compensées de manière interne à l'appareil. La vitesse angulaire sera donc modélisée comme suit

$$\tilde{\omega} = \lambda \cdot (\omega - b) + \varepsilon \tag{3.14}$$

où  $\tilde{\omega}$  est la vitesse angulaire vraie,  $\omega$  la vitesse angulaire mesurée,  $\lambda$  le facteur d'échelle,  $b$  le biais instantané et  $\varepsilon$  une erreur aléatoire normale. Ces différentes valeurs ne sont pas constantes lors de chaque enclenchement et varient également dans le temps pendant une utilisation continue. Cette seconde évolution peut être prise en compte par des modèles de Markov d'ordre adéquat.

Le défaut d'alignement de l'axe du gyroscope avec la verticale occasionne un facteur d'échelle supplémentaire sur les vitesses angulaires mesurées. Ce dernier, proportionnel au cosinus de l'erreur de verticalité, ne sera pas modélisé séparément mais inclus dans le facteur d'échelle global du senseur.

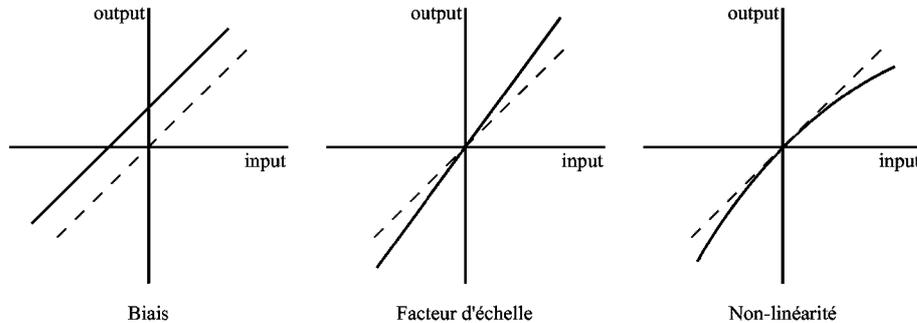


FIG. 3.7 – Principales erreurs input/output d'un gyroscope.

## 3.3 La barométrie

La pression atmosphérique en un point donné dépend en premier lieu de l'altitude de ce dernier. Ce principe sera à la base du nivellement barométrique dont l'instrumentation simple et peu onéreuse permet de déterminer des différences de niveau entre des positions. Certaines limitations sont cependant à prendre en considération. La pression atmosphérique varie principalement en fonction de la température de l'air, des conditions météorologiques

locales et, dans une moindre mesure, de l'humidité, de la latitude ainsi que de l'altitude elle-même. Afin de maintenir une précision optimale, la prise en compte de ces différents facteurs, ou leur suppression par barométrie relative et/ou différentielle, est donc indispensable. Les recherches relatives à ce thème ont été réalisées par Perrin (1999) où elles se trouvent décrites de façon complète.

### 3.3.1 Nivellement barométrique

Par définition, la pression est le rapport entre la force exercée sur une surface et l'aire de cette dernière. L'unité SI (Système International d'unités) pour la pression est le pascal (Pa) équivalent à une force de 1 newton (N), s'exerçant sur une surface de  $1\text{ m}^2$ .

En plus du pascal, bon nombre d'unités sont encore largement répandues. Le **Torr** est la pression induite par une colonne de mercure de 1 mm. L'**atmosphère** (atm) correspond, elle, à la valeur moyenne de la pression atmosphérique au niveau de la mer, qui est de 760 mm de mercure. Finalement, le **millibar** correspond à 100 Pa. Il s'agit d'une unité très pratique à manipuler pour la mesure de pression atmosphérique, contrairement au Pa qui prend des valeurs passablement élevées (pression normale:  $1.01325 \cdot 10^5$  Pa. Le tableau suivant Tab. 3.2 permet d'avoir une vision synoptique des différentes unités.

Pa	hPa	bar	mbar	Torr	atm
1	$10^{-2}$	$10^{-5}$	$10^{-2}$	$7.501 \cdot 10^{-3}$	$9.869 \cdot 10^{-6}$
100	1	$10^{-3}$	1	0.7501	$0.9869 \cdot 10^{-3}$
$10^5$	$10^3$	1	$10^3$	750.1	0.9869
100	1	$10^{-3}$	1	0.7501	$0.9869 \cdot 10^{-3}$
133.32	1.333	$1.33 \cdot 10^{-3}$	1.333	1	$1.316 \cdot 10^{-3}$
$1.013 \cdot 10^5$	1013	1.013	1013	760	1

TAB. 3.2 – Facteurs de conversion entre les unités de pression les plus communément utilisées (Sudau, 1994).

La difficulté majeure lors de la détermination d'altitude par mesure de pression est la prise en compte des conditions météorologiques changeantes. Pour ce faire, il existe deux modes de mesure principaux.

Le premier procédé consiste à calibrer le baromètre sur des points dont l'altitude est connue préalablement. Ceci suggère que l'on commence et termine un cheminement sur un point connu. L'écart de fermeture est réparti linéairement en fonction du temps sur les positions intermédiaires. Cette répartition présuppose que les conditions météorologiques évoluent linéairement dans le temps. L'intervalle considéré ne doit ainsi pas être trop important. Cette méthode est particulièrement adaptée pour connaître l'élévation d'une personne montant ou descendant des escaliers ainsi que tout déplacement vertical à l'intérieur d'un bâtiment non climatisé.

La deuxième méthode requiert l'emploi simultané de deux baromètres. Un appareil fait office de station de référence sur un point connu. Celui-ci est chargé d'enregistrer les variations météorologiques, afin de réduire leur influence lors de la détermination des nouvelles altitudes avec le deuxième capteur. Cette méthode donne en règle générale de meilleurs résultats que la précédente. Elle exige par contre la synchronisation des deux appareils ainsi qu'une étape d'étalonnage visant à éliminer tout biais.

### 3.3.2 Développement mathématique

Considérons un cylindre d'air vertical de section unitaire soumis à la pression atmosphérique (Kahmen et Faig, 1988). La pression régnant à l'altitude  $H$  est  $p$ , alors qu'à l'altitude  $H+dH$  elle n'est plus que de  $p-dp$ , selon le principe de diminution de pression avec l'altitude, Fig. 3.8. La variation de pression  $dp$  liée à la différence d'altitude  $dH$  peut

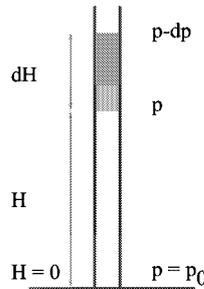


FIG. 3.8 – Relation entre la pression et l'altitude.

s'écrire comme le poids de la colonne d'air située entre les deux niveaux divisé par la surface du cylindre.

$$dp = -\rho \cdot g \cdot dH \quad (3.15)$$

$\rho$  représente la densité de l'air et  $g$  l'accélération terrestre. Le signe négatif traduit le fait que l'altitude et la pression varient de manière opposée. Selon la loi de Gay-Lussac, on peut écrire

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{p}{p_0} \cdot \frac{1}{1 + \alpha T} \quad (3.16)$$

où  $p_0$  et  $\rho_0$  sont les pression et densité de l'air à  $0^\circ$  C et  $\alpha$  est le coefficient d'expansion de l'air lié à la température  $t$  de ce dernier. En substituant l'expression de  $\rho$  de (Eq. 3.16) dans (Eq. 3.15), on obtient

$$\frac{dp}{p} = -\frac{\rho}{\rho_0} \cdot \frac{g}{1 + \alpha T} \cdot dH \quad (3.17)$$

En intégrant des deux côtés de l'égalité, l'équation devient

$$\ln p = -\frac{\rho}{\rho_0} \cdot \frac{g}{1 + \alpha T} \cdot H + C \quad (3.18)$$

La constante d'intégration  $C$  est éliminée en effectuant des mesures de pression simultanément en deux points. Si à la station de référence on mesure la pression  $p_1$  et au point mobile la pression  $p_2$ , en considérant l'équation (Eq. 3.18) nous obtenons

$$\ln p_1 - \ln p_2 = -\frac{\rho}{\rho_0} \cdot \frac{g}{1 + \alpha T} \cdot (H_2 - H_1) \quad (3.19)$$

La prise en compte de l'altitude moyenne  $H_m$ , de la température moyenne de l'air  $T_m$  [ $^{\circ}C$ ], de l'humidité relative  $hr$  [%] et de la latitude moyenne  $\phi_m$  conduisent à la *formule de Jordan*

$$\Delta H = 18400 \lg \frac{p_1}{p_2} \cdot (1 + \alpha T_m) \cdot (1 + 0.377 \frac{hr}{p_m}) \cdot (1 + \beta \cos 2\phi_m) \cdot (1 + \frac{2H_m}{R}) \quad (3.20)$$

où  $\alpha = 0.003665$ ,  $\beta = 0.00264$  et  $R = 6'3700'000m$ .

La formule de Jordan fait l'hypothèse que les mesures sont effectuées simultanément et que la température de la colonne d'air décroît uniformément de bas en haut. Cette dernière condition est rarement satisfaite pour des différences d'altitude importantes. Cependant pour l'application particulière considérée, cette caractéristique peut être considérée comme vraie. Une modélisation plus poussée des couches d'air serait très fastidieuse et n'apporterait aucun gain de précision considérant la dynamique du mouvement.

Il existe une autre formule, connue sous le nom de *formule de Laplace* (Eq. 3.21). Celle-ci diffère principalement de celle de Jordan par l'introduction d'un terme correctif  $c_1$  lié à la température  $t_m$  [ $^{\circ}C$ ]

$$\Delta H = 18376.03 \lg \frac{p_1}{p_2} \cdot (\frac{t_m}{273.16}) \cdot (1 + 0.378 \frac{hr}{p_m} 10^c) \cdot (1 + \beta \cos 2\phi_m) \cdot (1 + \frac{2H_m}{R}) \quad (3.21)$$

$$c = -7.9(\frac{373.2}{t_m} - 1) + 5 \lg \frac{373.2}{t_m} - 1.4 \cdot 10^{-7} \cdot 10^{11.3(1 - \frac{373.2}{t_m})} + 8.1 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{(-4.5 + \frac{373.2}{t_m})} \quad (3.22)$$

Jusqu'ici, seules des différences d'altitudes ont été considérées. L'altitude absolue sera initialisée sur un point connu ou par l'intermédiaire de la technologie GPS. Si aucune de ces informations n'est disponible, l'utilisation de la relation (Eq. 3.23) déduite de l' *US Standard Atmosphere 1976* (NOAA, 1976) peut être appliquée:

$$h = \frac{288.15[K]}{0.0065[K/m]} \cdot \left( 1 - \left( \frac{p}{101325[Pa]} \right)^{0.0065[K/m] \cdot \frac{R}{g}} \right) \quad (3.23)$$

où  $R = 287.053 [m^2/(s^2 \cdot K)]$  et  $g = 9.80665 [m/s^2]$ .

Cette équation est basée sur les hypothèses que la pression à l'altitude 0 est de 101325 Pa pour une température de 288.15 K (15 $^{\circ}$  C et que le gradient diminue de 6.5 $^{\circ}$  K par kilomètre. L'altitude déduite de cette manière ne tient en aucun cas compte d'éventuels changement de temps (basse-haute pression) de même que de la température ambiante. Considérant la fiabilité, cette équation servira uniquement à borner les valeurs accumulées par barométrie différentielle en cas d'absence prolongée de GPS ou de points de nivellement.

### 3.4 Le système NAVSTAR-GPS

Indépendamment de tout système cartographique, la nécessité d'une localisation absolue est nécessaire si l'on souhaite évoluer dans un référentiel géodésique fixé à l'échelle de la planète. Par absolu on entend la possibilité de se localiser sans référence à des points de coordonnées connues, définissant par là-même un positionnement relatif. Le système satellitaire NAVSTAR-GPS (Global Positioning System) (Parkinson et Spilker, 1996; Leick, 1994; Teunissen et Kleusberg, 1996) permet de répondre à ce besoin sous réserve d'une bonne visibilité céleste. La gamme de précision qu'il est possible d'obtenir varie aussi bien en fonction du type de capteur que de la méthode de traitement utilisée, Fig. 3.9. Dans le

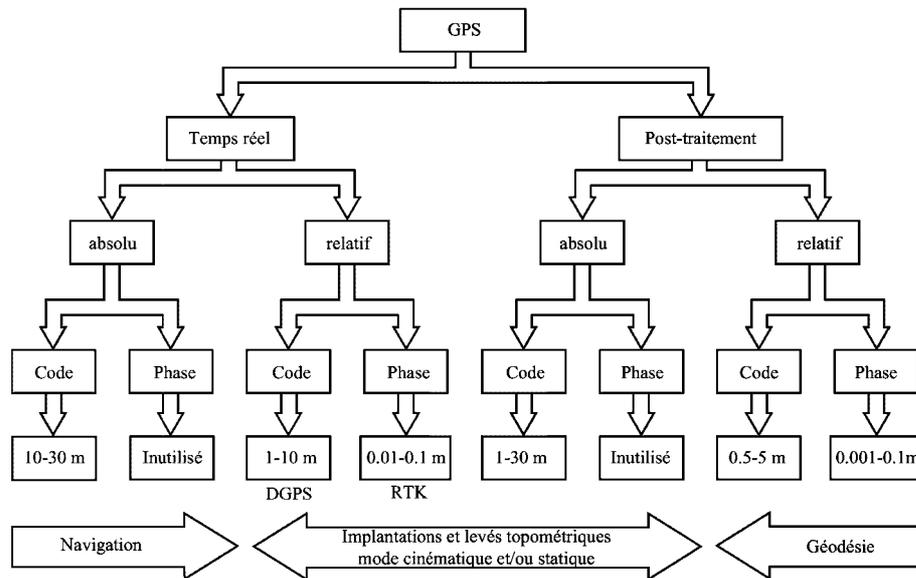


FIG. 3.9 – Les différents modes de mesures GPS avec leur précision indicative en position. Celle-ci peut néanmoins varier en fonction du type de récepteur utilisé (Gilliéron, 2002).

présent travail, les applications requièrent l'utilisation d'un seul récepteur GPS, ceci pour des raisons de coût ainsi que de sécurité. La précision considérée pour les positions absolues satellitaires varie entre 10 et 20 mètres en planimétrie contre 20 à 30 mètres en altimétrie. La forte corrélation temporelle entre les mesures de code ainsi que celles de phase (Rey, 1997) permet cependant d'obtenir, après filtrage, des informations différentielles facilitant le calibrage des différents modèles biomécaniques de manière précise et fiable.

#### 3.4.1 Système de coordonnées

La constellation GPS étant définie par rapport au système de référence WGS84, il est indispensable de s'assurer que les données issues de la navigation à l'estime se trouvent bien dans le même datum. Comme il est probable que les coordonnées planimétriques soient connues dans une projection cartographique locale (Suisse, UTM, ...), celles-ci devront être préalablement transformées avant toute intégration. Le déplacement sur l'ellipsoïde

obtenu à partir de la navigation à l'estime dans un plan tangent à ce-dernier s'écrit

$$\varphi_k = \varphi_{k-1} + \frac{Est_k - Est_{k-1}}{M} \quad (3.24)$$

$$\lambda_k = \lambda_{k-1} + \frac{Nord_k - Nord_{k-1}}{N \cdot \cos(\varphi)} \quad (3.25)$$

$M$  est le rayon de courbure de l'ellipsoïde selon le méridien  $\varphi$  au point  $(\varphi, \lambda)$  et  $N$  est la normale en ce même point (Leick, 1994).

### 3.4.2 Système de hauteurs

Les altitudes obtenues par nivellements, qu'elles soient trigonométriques ou barométriques, sont exprimées par rapport à une surface de référence passant par le niveau moyen des mers. Cette surface est appelée le *géοïde*. Les altitudes elles sont qualifiées d'*orthométriques* ( $H$ ) en opposition à celles dites *ellipsoïdiques* ( $h$ ) exprimées par rapport à l'ellipsoïde de référence et pouvant être calculées à partir des signaux satellitaires. La *cote du géοïde* ( $N$ ) est la différence entre les deux surfaces, Fig. 3.10. Celle-ci est indispensable à toute conversion d'altitude et peut être calculée à partir de modèles prédéfinis, de précision variable. A titre d'information, ces cotes varient par rapport à l'ellipsoïde WGS84 entre +70 m et -100 m, ce qui est loin d'être négligeable.

## 3.5 Propagation des incertitudes

L'utilisation de mesures dans toute représentation de la réalité introduit de fait des erreurs dans les différents modèles considérés. Celles-ci proviennent principalement des capteurs utilisés, de leur résolution, mais également des hypothèses et simplifications retenues lors de toute modélisation. Les incertitudes sur les données se répercutent ensuite, par le truchement des fonctions établies, sur les résultats. A ces derniers on devrait donc toujours ajouter une indication de leur précision de manière à pouvoir les intégrer de manière pondérée dans des traitements ultérieurs. Une étude du suivi de la qualité appliqué principalement aux données spatiales a été réalisée par Azouzi (2000).

L'approche analytique de la *propagation des variances* permet de quantifier l'incertitude finale en tenant compte de toutes les erreurs commises sur les diverses variables d'une fonction. Cette méthode est adaptée aux modèles mathématiquement bien définis et dont les erreurs sont quantifiables et faibles. Elle a cependant ses limites pour des modèles complexes comme décrits dans Ladetto (1997); Bögli (1998).

Le développement mathématique est le suivant. Soit  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ . L'incertitude sur  $y$ , notée  $s_y$ , s'obtient par

$$s_y^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 \cdot s_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 \cdot s_{x_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)^2 \cdot s_{x_n}^2 \quad (3.26)$$

$$+ 2 \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right) \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right) \cdot s_{x_1 x_2} + \dots + 2 \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x_{n-1}}\right) \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right) \cdot s_{x_{n-1} x_n}$$

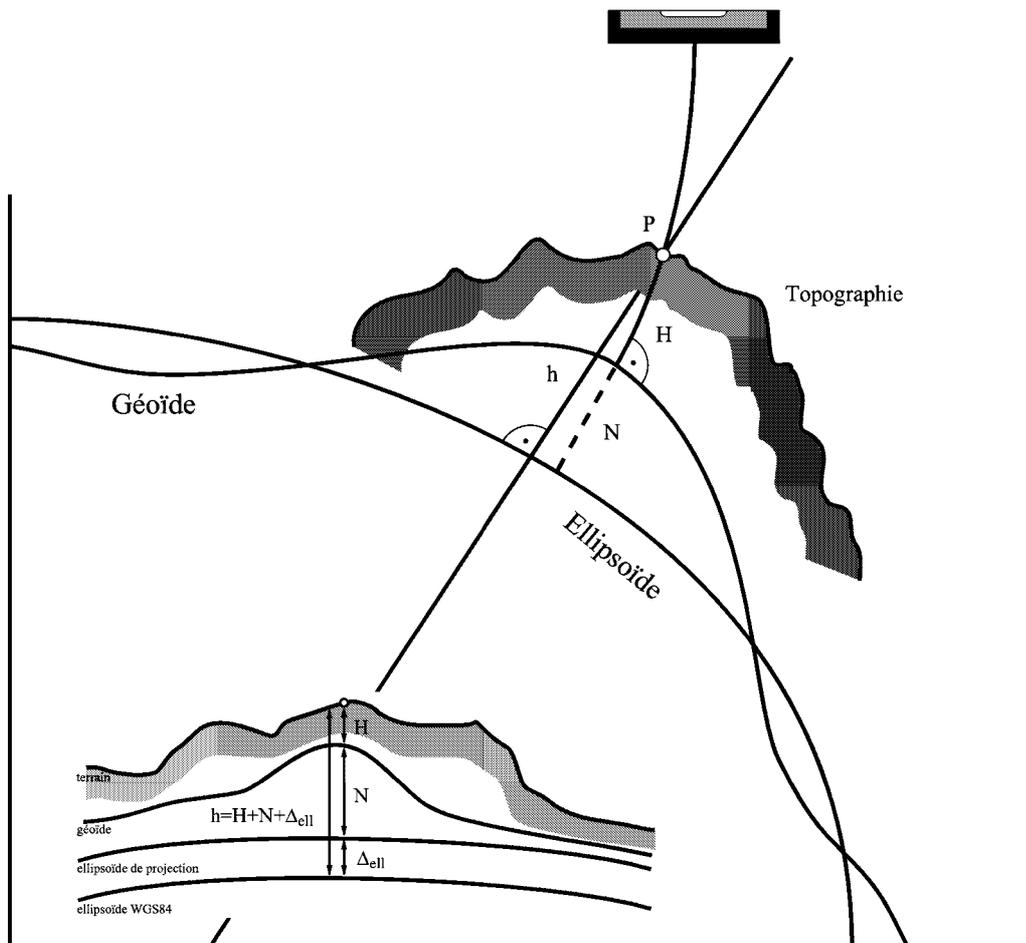


FIG. 3.10 – Relation entre les altitudes orthométrique, ellipsoïdique et la cote du géoïde. Si la cote du géoïde est fournie par rapport à un autre ellipsoïde que WGS84, la différence entre ceux-ci doit être prise en compte lors du calcul de la hauteur mesurée par GPS.

Si l'on adopte une écriture matricielle, (Eq. 3.26) s'écrit

$$s_y^2 = \mathbf{F}^T \cdot \mathbf{K}_{11} \cdot \mathbf{F} \quad (3.27)$$

où  $\mathbf{F}^T = \left[ \frac{\partial f}{\partial x_1} \quad \frac{\partial f}{\partial x_2} \quad \dots \quad \frac{\partial f}{\partial x_n} \right]$  dérivées partielles par rapport aux variables

et  $\mathbf{K}_{11} = \begin{bmatrix} s_{x_1}^2 & s_{x_1 x_2} & \dots & s_{x_1 x_n} \\ s_{x_2 x_1} & s_{x_2}^2 & & \\ \vdots & & \ddots & \\ s_{x_n x_1} & & & s_{x_n}^2 \end{bmatrix}$  matrice des covariances

Dans la majeure partie des situations et par méconnaissance des corrélations entre les différentes variables, celles-ci seront considérées comme indépendantes, i.e.  $s_{x_i x_j} = 0$  si  $i \neq j$ .

L'équation (Eq. 3.26) se simplifie donc à

$$s_y^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 \cdot s_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 \cdot s_{x_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)^2 \cdot s_{x_n}^2 \quad (3.28)$$

Cette dérivation est valable pour toutes les fonctions, qu'elles soient linéaires ou non. Dans le cas de non-linéarité ceci s'apparente à un développement de Taylor de premier ordre comme établi pour l'erreur d'horizontalité à l'équation (Eq. 3.9). On prendra cependant garde à la courbure de la fonction au point d'estimation avant de déduire toute incertitude.

### 3.5.1 Incertitude altimétrique

La précision de la détermination des altitudes barométriques va dépendre directement de la qualité des mesures effectuées. En appliquant la loi de propagation des erreurs (Eq. 3.27) à la formule de Jordan (Eq. 3.20) il est possible d'effectuer une étude de sensibilité des différents paramètres. Pour des raisons pratiques, les dérivées partielles ont été calculées avec le logiciel de mathématique *Maple*<sup>®</sup> et ne sont pas décrites ici.

$$d\Delta H = \frac{\partial d\Delta H}{\partial p_1} dp_1 + \frac{\partial d\Delta H}{\partial p_2} dp_2 + \frac{\partial d\Delta H}{\partial t_m} dt_m + \frac{\partial d\Delta H}{\partial hr} dhr + \frac{\partial d\Delta H}{\partial p_m} dp_m + \frac{\partial d\Delta H}{\partial \phi_m} d\phi_m \quad (3.29)$$

Le paramètre ayant la plus grande influence est la pression. Une erreur moyenne de 0.1 mbar entraîne une erreur de 1.16 m sur la différence d'altitude calculée. La précision altimétrique sera donc essentiellement dépendante du type de capteur de pression utilisé. La température, elle, doit être connue précisément pour de grandes différences d'altitude. Jusqu'à 100 m de dénivellation, une erreur de 5° C n'engendre qu'une erreur de 2 m sur l'altitude, alors que pour la même précision, il faut connaître la température à 1° C pour une différence d'altitude de 500 m. L'humidité relative, la latitude ainsi que l'altitude moyenne jouent un rôle négligeable et des valeurs approximatives n'ont aucune influence sur le résultat final.

Des tests dynamiques ont été effectués en voiture et à pied afin de déterminer l'influence de la vitesse sur les pressions mesurées. L'effet principal à prendre en compte est celui du vent sur le capteur de pression, augmentant cette dernière et provoquant une sous-estimation de l'altitude. Cette remarque est principalement vraie pour des déplacements en voiture où une corrélation de 0.87 a été calculée entre la vitesse et l'erreur d'altitude. Concernant la marche et de par les vitesses considérées, aucune influence n'a été observée, l'erreur supposée se trouvant la plupart du temps inférieure à la résolution du capteur utilisé. Par précaution et pour garantir une précision maximale, l'installation du capteur dans le dos de la personne est recommandé.

## Bibliographie

Azouzi, M. (2000). *Suivi de la qualité des données spatiales au cours de leur acquisition et de leurs traitements*. PhD thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).

- Bögli, G. (1998). Propagation des erreurs dans les analyses multicritères. problématique du traitement des résidus des cendres d'incinération. Travail de diplôme, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).
- Britting, K. R. (1971). *Inertial Navigation Systems Analysis*. Wiley-Interscience.
- Caruso, M. J. (1997). Applications of magnetoresistive sensors in navigation systems. *Sensor and Actuators*, (SAE SP-1220):15–21.
- Caruso, M. J. (2000). Applications of magnetic sensors for low cost compass system. In *IEEE Positioning, Location, and Navigation Symposium (PLANS)*, pages 177–184.
- Denne, W. (1979). *Magnetic Compass Deviation and Correction*. Brown, Son & Fergusson Ltd, Scotland.
- Gabaglio, V. (2002). *GPS/INS System Integration for Pedestrian Navigation*. PhD thesis, Ecole Polytechnique Fédérale Lausanne (EPFL).
- Gilliéron, P. (2002). La méthode gps. Cours EPFL.
- Howald, P. (1990). Topographie 2. Notes de cours, EPFL.
- Kahmen, H. et Faig, W. (1988). *Surveying*. Walter de Gruyter, Berlin.
- Ladetto, Q. (1997). Approche analytique de la propagation des erreurs dans un écobilan. Rapport de semestre, Institut de Géomatique/Topométrie, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Ladetto, Q., Gabaglio, V., et Merminod, B. (2001). Combining gyroscopes, magnetic compass and GPS for pedestrian navigation. *Proc. Int. Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation (KIS 2001)*, pages 205–212.
- Lawrence, A. (1993). *Modern Inertial Technology: Navigation, Guidance and Control*. Springer-Verlag, New-York, NY, 2nd edition.
- Leick, A. (1994). *GPS Satellite Surveying*. John Wiley & Sons, INC.
- NOAA (1976). US standard atmosphere 1976. Technical report, NOAA - S/T 76,1562, Washington, D.C.
- Parkinson, B. W. et Spilker, J. J. (1996). *Global Positioning System: Theory and Applications*, volume 163-164. Progress in Astronautics and Aeronautics.
- Perrin, O. (1999). Intégration de mesures satellitaires et barométriques pour la localisation 3D. Travail de diplôme, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).
- Rey, J. M. (1997). Techniques GPS en mode cinématique. Travail de diplôme, Ecole Polytechnique Fédérale Lausanne (EPFL).
- Stork, T. (2000). Electronic compass design using KMZ51 and KMZ52. Application Note AN00022.
- Sudau, A. (1994). *Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit elektronischer Druckaufnehmer für präzise barometrische Höhenmessungen*. PhD thesis, Bayerischen Akademie des Wissenschaften, München.
- Teunissen, P. J. G. et Kleusberg, A. (1996). *GPS for Geodesy*. Springer, 2 edition.
- Titterton, D. H. et Weston, J. L. (1997). *Strapdown inertial navigation technology*. Peter Peregrinus Ltd, United Kingdom.



## Chapitre 4

# Instrumentation et algorithmique

*Ce qui va de soi, c'est ce qui va mal.*

Alain

Les contraintes de taille et de poids des capteurs liées à la navigation pédestre justifient la réalisation d'un système approprié intégrant et synchronisant toutes les données. La fréquence de mesure élevée comparée à la dynamique du mouvement chez l'être humain donne au filtrage numérique toute son importance. Un simple filtrage passe-bas n'est en effet pas approprié car il tend à éliminer les changements de directions brusques de la marche. Finalement, l'obtention de l'information en temps réel ou en post-traitement influence directement le choix algorithmique retenu.

### 4.1 Instrumentation

Les composantes principales du système de navigation pédestre sont décrites en relation au tableau Tab. 4.1. Le microprocesseur principal est relié par un bus bi-directionnel aux modules périphériques suivants.

- Un compas magnétique composé d'une triade de capteurs magnétorésistifs (MR) et d'accéléromètres micro-électromécaniques (MEMS) disposés orthogonalement. Cette dernière technologie a été préférée aux senseurs de type fluxgate pour une raison de coût ainsi qu'aux capteurs à effet Hall pour une plus grande sensibilité dans les applications considérées, (Stork, 2000). La fréquence de mesures brutes retenue est de 30 Hz. La précision des magnétomètres est de  $\pm 100\mu T$  avec une résolution de  $0.01\mu T$ . Dans des conditions statiques, la précision de l'azimut est de  $0.5^\circ$  ( $2\sigma$ ).
- Un gyroscope à plaque de céramiques vibrantes mesurant la force de Coriolis. La précision des vitesses angulaires est de  $0.1^\circ$  pour une plage de mesure de  $\pm 100^\circ$ . La fréquence de mesure est de 30 Hz.

- Un capteur de pression piézo-résistif d'une précision absolue de  $\pm 1.5$  mbar et relative de  $\pm 0.5$  mbar. La résolution est de 0.1 mbar. Le module intègre également un thermomètre dont la précision est de  $\pm 0.8^\circ\text{C}$  pour une résolution de  $0.01^\circ\text{C}$ . La fréquence de mesure est de 1 Hz.
- La position ainsi que la vitesse absolues sont obtenues par un récepteur GPS mono-fréquence pouvant fournir des données jusqu'à une fréquence de 10 Hz. La position est calculée à partir du code L1 lissé par les mesures de phase (Hatch, 1982).
- Pour des applications en temps réel, l'interface retenue est un assistant de poche de type iPAQ Pocket PC. Si seul un post-traitement est d'intérêt, toutes les données sont enregistrées sur une unité mémoire Flash.

L'utilisation ainsi que le statu des différents capteurs peuvent être contrôlés et modifiés en tout temps, ce qui rend le système robuste et fiable lors d'essais prolongés.

Senseurs	Plage de mesure	Résolution	Précision	Fréquence
Accéléromètres	2 g	$0.05 \text{ m/s}^2$	$\pm 0.1 \text{ m/s}^2$	30-150 Hz
Magnétomètres	$\pm 100 \mu\text{T}$	$0.01 \mu\text{T}$	$\pm 0.02 \mu\text{T}$	30-150 Hz
Gyroscope	$\pm 100 ^\circ/s$	$0.05 ^\circ/s$	$\pm 1^\circ$	30 Hz
Baromètre 1	225 - 1125 mbar	0.1 mbar	$\pm 1/\pm 0.3$ mbar	0.5 Hz
Thermomètre 1	-20 - 60 $^\circ\text{C}$	0.1 $^\circ\text{C}$	$\pm 0.3 ^\circ\text{C}$	0.5 Hz
Baromètre 2	750 - 1100 mbar	0.1 mbar	$\pm 1/\pm 0.5$ mbar	1 Hz
Thermomètre 2	-10 - 60 $^\circ\text{C}$	0.015 $^\circ\text{C}$	$\pm 0.8 ^\circ\text{C}$	1 Hz
GPS	-	-	$\sim 20$ m	10 Hz

TAB. 4.1 – *Caractéristiques des différents capteurs utilisés durant la recherche. Concernant les baromètres, les précisions absolues et relatives sont mentionnées.*

L'intégration des différentes composantes fut réalisée en collaboration avec Leica Vectronix AG et donna lieu à un prototype industriel dénommé Pedestrian Navigation Module (PNM), Fig. 4.2. Les dimensions du circuit imprimé sont de 73.7 mm x 48.3 mm x 18 mm pour un poids inférieur à 50 grammes. La consommation électrique actuelle varie entre 350 mW et 1 W selon que le GPS est enclenché en permanence ou en mode économique (Trigger mode).

## 4.2 Un déplacement en polygonale

Le déplacement d'une personne peut être perçu comme un cheminement polygonal en topométrie. La distance entre deux sommets correspond à une enjambée, alors que l'angle permettant d'aller d'un point à l'autre est tout simplement l'azimut de déplacement. Les deux points de rattachement aux extrémités de la polygonale ont des positions aux coordonnées connues ou obtenues par mesures GPS. L'expression mathématique d'une trajectoire s'exprime donc de la manière suivante:

$$Est_{final} = Est_{initial} + \sum_{i=1}^n d_i \cdot \sin \alpha_i \quad (4.1)$$

$$Nord_{final} = Nord_{initial} + \sum_{i=1}^n d_i \cdot \cos \alpha_i \quad (4.2)$$

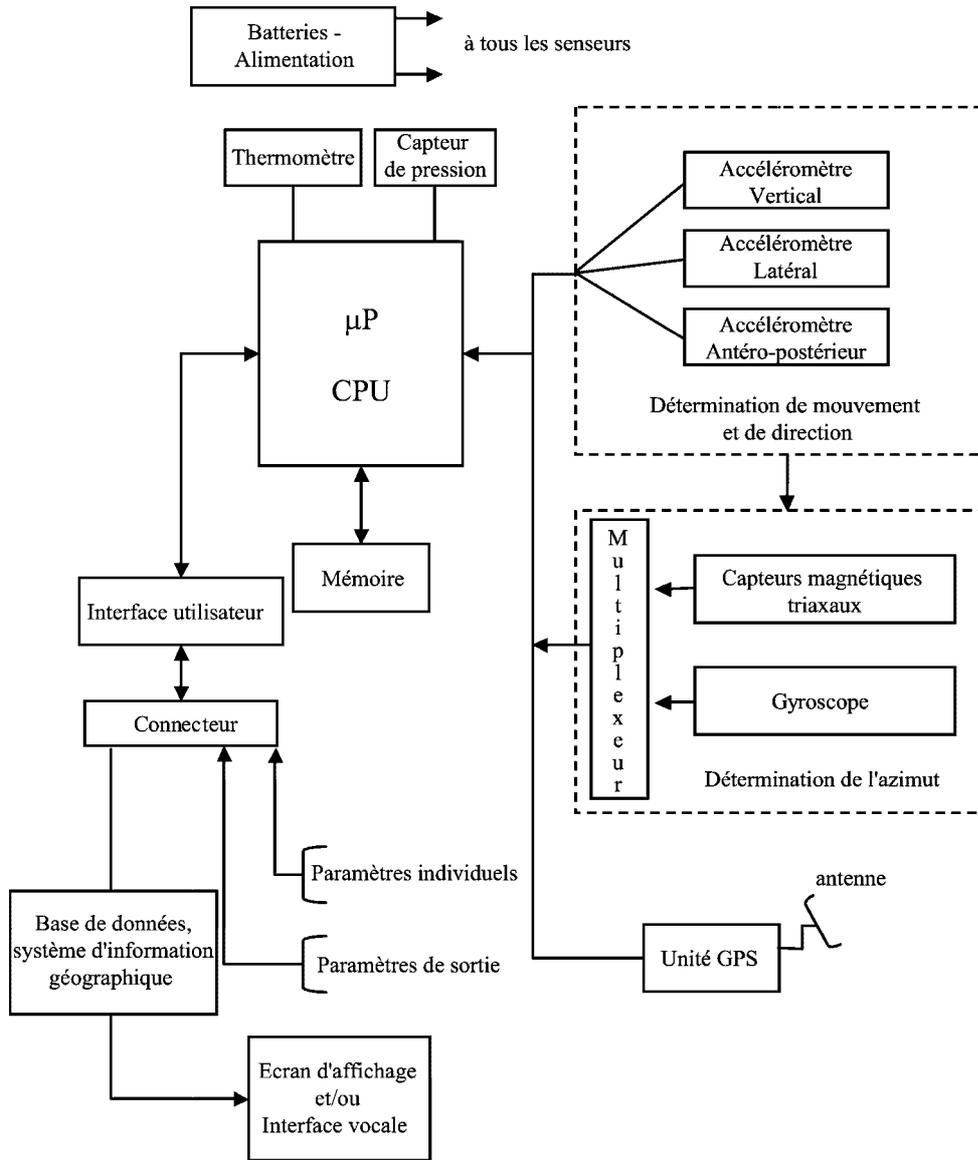


FIG. 4.1 – Représentation schématique du système de navigation pédestre. Les différents capteurs fonctionnent en parallèle à des fréquences pouvant être choisies par l'utilisateur selon le type d'application désiré. Une interface graphique ou vocale liée à une base de données permet une navigation interactive également pour les personnes aveugles.

où  $n$  est le nombre de pas,  $d$  la taille des pas calculée et  $\alpha_i$  l'azimut mesuré.

La précision de la position finale est calculée en appliquant la loi de propagation des incertitudes (Eq. 3.27) aux relations 4.1 et 4.2:

$$\sigma_{Est_i}^2 = \sigma_{Est_{i-1}}^2 + \sin^2 \alpha \cdot \sigma_{d_i}^2 + d_i^2 \cdot \cos^2 \alpha_i \cdot \sigma_{\alpha_i}^2 \quad (4.3)$$

$$\sigma_{Nod_i}^2 = \sigma_{Nod_{i-1}}^2 + \cos^2 \alpha \cdot \sigma_{d_i}^2 + d_i^2 \cdot \sin^2 \alpha_i \cdot \sigma_{\alpha_i}^2 \quad (4.4)$$

A ce stade il est important de préciser que l'élément sur lequel se basent tous les développements n'est pas temporel avec comme référence la seconde, mais événementiel avec comme

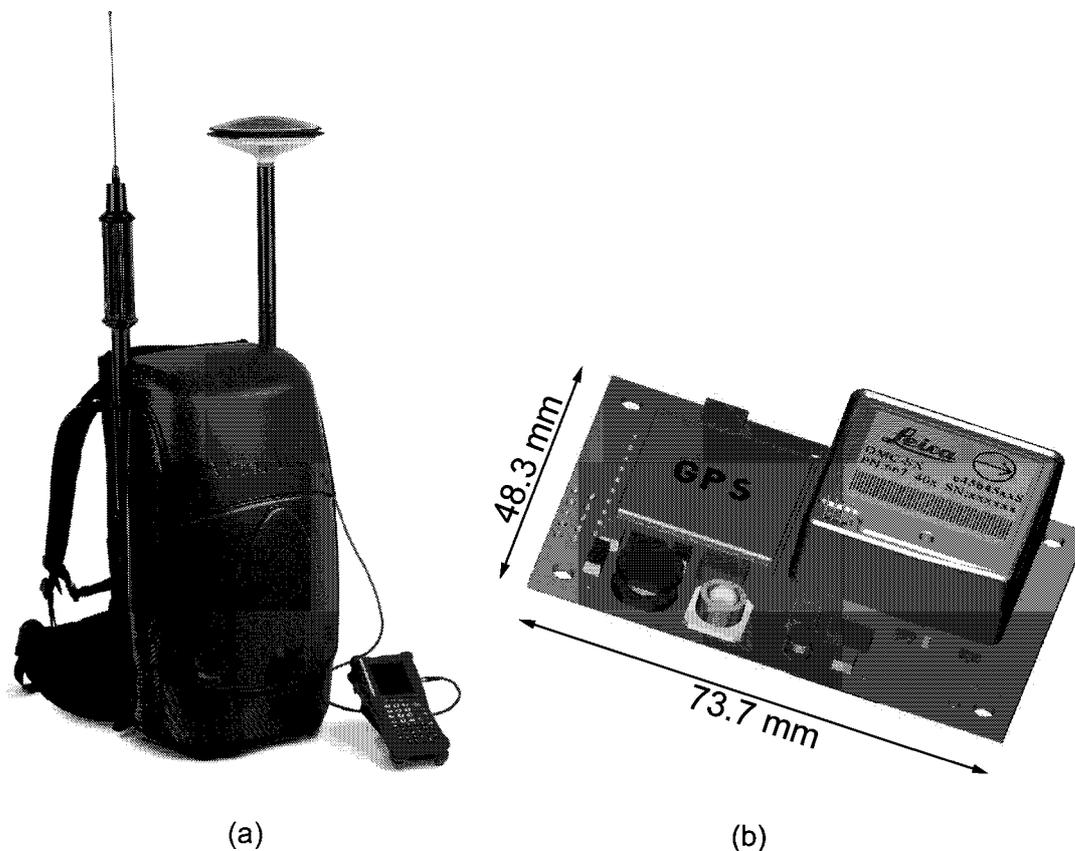


FIG. 4.2 – Le système POS/LS<sup>TM</sup> (Position and Orientation System for Land Survey) de chez Applanix (a) fut utilisé comme référence pour différents tests visant à valider l'approche développée. Le module permettant une mécanisation classique mesure 66 cm x 35 cm x 27 cm pour environ 22 kg (48 pounds). Les résultats sont présentés au paragraphe 4.6.1. (b) Module de Navigation Pédestre développé dans le cadre de ce travail de recherche en collaboration avec Leica Vectronix AG. La taille de 73.7 mm x 48.3 mm x 18 mm et un poids inférieur à 50 grammes répondent aux exigences ergonomiques de l'application.

unité le pas. Ce changement par rapport à la navigation classique se justifie par l'approche adoptée par la suite, de même que par l'utilisation des différents capteurs. En effet, aucune dégradation de position n'a de cause temporelle: l'erreur de position n'augmente pas lorsque la personne est immobile comme c'est le cas si l'on utilise l'accélération pour déterminer une distance parcourue. Cependant, dès que la personne effectue un pas, les effets extérieurs joints aux limitations naturelles des modèles utilisés détériorent la précision de l'information géographique. Ce choix est également dicté par la dépendance spatiale et non temporelle des perturbations magnétiques influençant directement la qualité de l'azimut calculé. L'intégration des différentes mesures, ainsi que leurs traitements pour obtenir les paramètres de marche souhaités, sont décrits aux sous-chapitres suivants. La figure Fig. 4.3 propose une description générale de la méthodologie suivie.

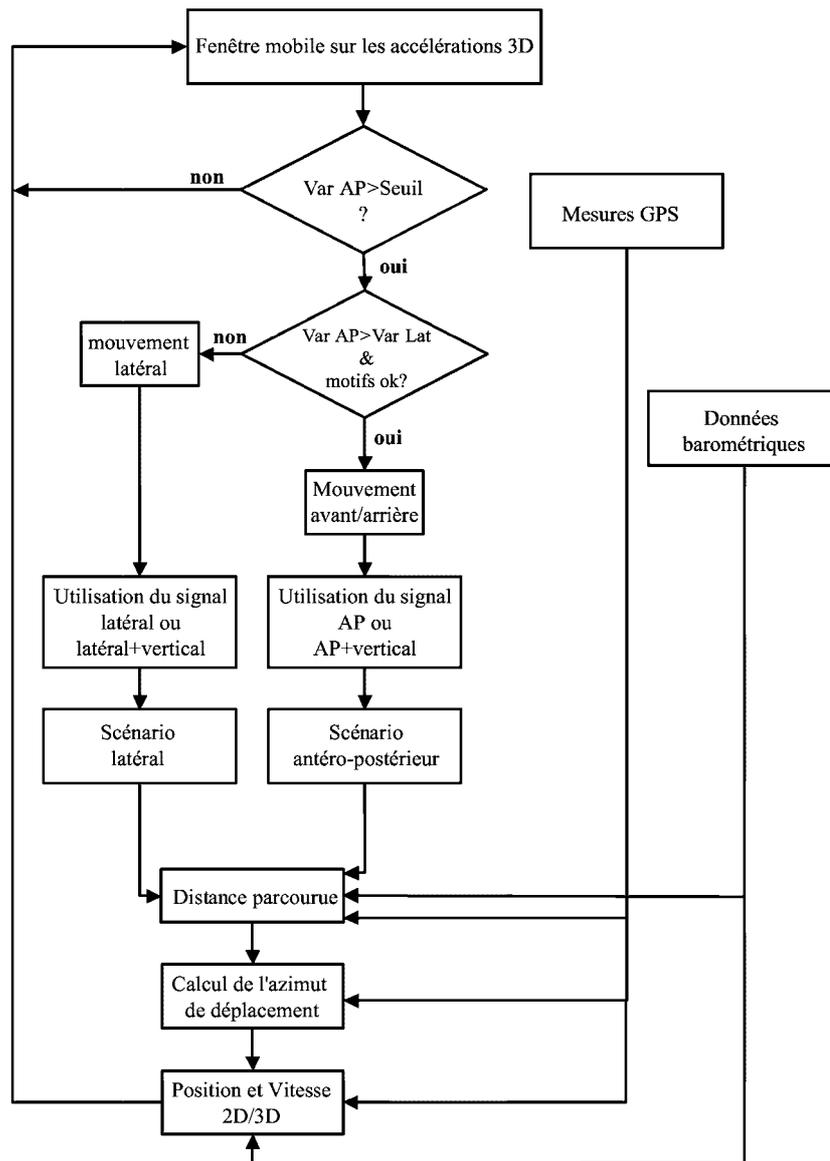


FIG. 4.3 – Représentation globale des algorithmes de navigation pédestre. Avant toute détermination d'azimut, différents tests sont réalisés afin de savoir dans quelle direction la personne effectue un mouvement. Dans un second temps la solution de navigation à l'estime est calculée et ses composantes sont comparées avec les valeurs obtenues par les autres senseurs.

### 4.3 L'accélérométrie: des intérêts antagonistes

L'utilisation d'une fréquence d'échantillonnage de 30 Hz du signal accélérométrique permet d'en extraire toutes les composantes significatives de la marche. Simultanément, les signaux seront nécessaires pour définir, par l'intermédiaire de la gravité, le défaut d'horizontalité du compas ainsi que du gyroscope. En phase de mouvements, de nombreuses accélérations parasites dues à la marche viennent noyer les composantes du champ gravifique. Un filtre passe-bas relativement fort (et par conséquent étendu dans le temps) est nécessaire afin de retrouver les valeurs originales. Ces antagonismes imposent un traitement séquentiel bien défini des accélérations. Dans un premier temps elles déterminent la direction du mouvement pour être ensuite filtrées afin de permettre le calcul de l'azimut

de déplacement.

### 4.3.1 Détection et direction du mouvement

La mobilité pédestre peut se diviser en deux états: la marche et l'arrêt. La distinction de ces deux situations est le point de départ des algorithmes développés.

On entend par direction de mouvement si la personne marche dans une direction antéro-postérieure (avant-arrière) ou latérale (gauche-droit). Comme le compas et le gyroscope sont orientés de manière permanente par rapport au corps, connaître la direction du mouvement est indispensable afin d'ajouter le décalage correct à l'azimut mesuré. Lorsqu'une personne se déplace, le signal accélérométrique tri-dimensionnel présente des motifs particuliers traduisant une certaine excitation. Ces valeurs d'excitations calculées sont exprimées par la variation des différents signaux élevés à une puissance donnée (1 pour l'écart-type, 2 pour la variance, etc. ). Cet indicateur, obtenu grâce à une fenêtre mobile, permet d'obtenir une différenciation robuste entre les phases de marche et d'arrêt. Le résultat active soit la suite du traitement, soit le prolongement de la veille événementielle. Simultanément, une comparaison de l'activité dans les directions antéro-postérieure et latérale définit les canaux accélérométriques ainsi que les motifs spécifiques à considérer pour la détection de mouvement. A ce stade, et pour chaque direction, deux signaux AP-Z ou LAT-Z sont disponibles. Le signal vertical présente l'avantage de posséder toujours les mêmes caractéristiques globales permettant de détecter un événement *pas*. La détection proprement dite s'effectue grâce à une deuxième fenêtre mobile. Celle-ci doit être assez petite pour ne pas englober deux *pas* et suffisamment grande pour que l'événement détecté soit bien un *pas*. Le processus de détection est le suivant:

- Un maxima est considéré comme un *pas* potentiel si celui-ci se trouve au centre ( $n+1$ ) de la fenêtre mobile de taille  $2 \cdot n + 1$ .
- Si un deuxième *pas* est détecté dans un intervalle de temps physiologiquement réaliste ( $0.25 \leq \Delta t \leq 1.5$ ), alors le pas précédent est validé et la personne est considérée en déplacement. Si  $\Delta t \leq 0.25$ , on attend la prochaine détection et le deuxième *pas* n'est pas retenu. Si aucun pas n'est détecté après 1.5 secondes, alors la personne vient de terminer une période de marche.
- Recherche et analyse temporelle des différents maxima et minima successifs sur les signaux à disposition, comme décrits dans Fig. 2.13, afin de déterminer la direction du mouvement.

L'utilisation des signaux AP-LAT uniquement permet également la détection des différents mouvements mais de manière moins robuste. Une fois les extrema connus, toutes les informations requises pour l'utilisation des modèles prédictifs de la taille des pas sont déterminées. Une description générale de la succession des différents traitements est présentée à la figure Fig. 4.3. Différentes possibilités de traitement ont été réalisées en collaboration avec Steiner (2002). Les méthodes se basent sur l'hypothèse qu'avant tout traitement, les signaux sont projetés dans le plan horizontal prenant en considération le défaut d'alignement du système de mesure.

### 4.3.2 Une normalisation souhaitable?

Toute personne présentant des caractéristiques individuelles dans le style de marche, une normalisation du signal observé permet de le comparer à des motifs représentatifs de mouvements définis. Les événements *pas* seront donc ajustés simultanément par rapport à leur amplitude et à leur durée, ou au nombre d'échantillons.

Si la normalisation de la valeur de l'accélération est aisée, son homologue temporelle se révèle plus complexe compte tenu du nombre fini d'échantillons. Selon que le facteur de normalisation est inférieur ou supérieur à l'unité, il faut soit enlever, soit répéter des mêmes éléments du signal considéré (théorie du Time Warping (Sankoff et Kruskal, 1983)). Une telle opération, illustrée à la figure Fig. 4.4, crée des paliers très visibles détériorant de manière importante l'allure générale du pas.

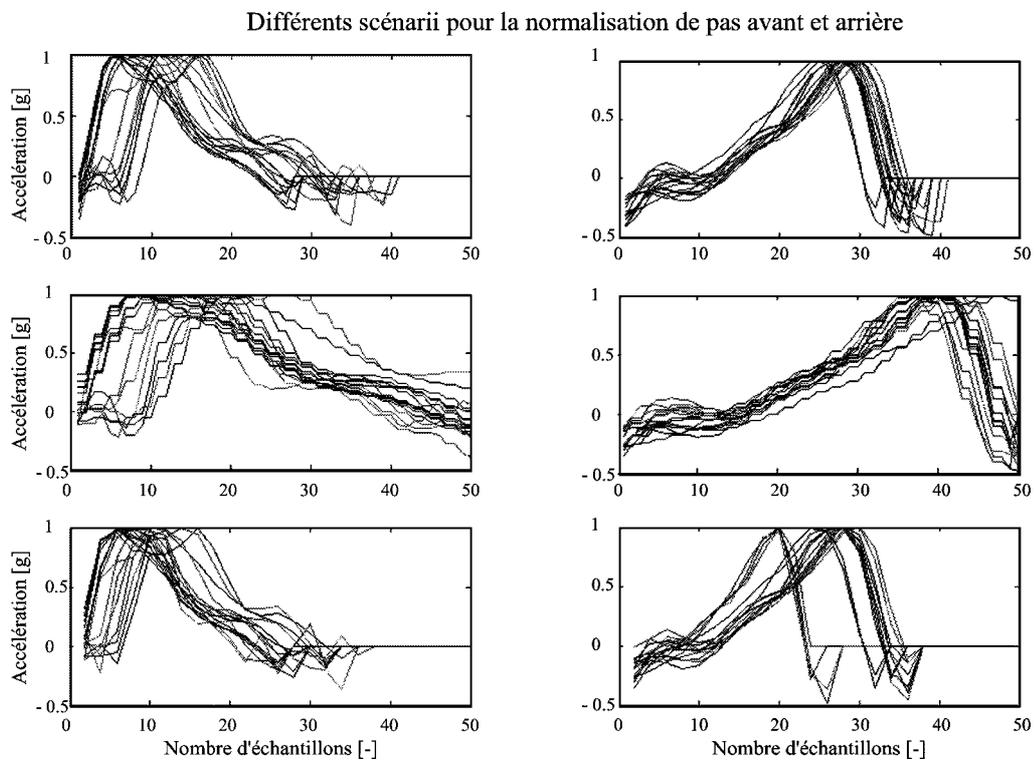


FIG. 4.4 – Diverses normalisations pour la détection de pas avant (gauche) et arrière (droite). On observe une simple normalisation sur les amplitudes (haut), une normalisation simultanée des amplitudes et de la durée sur plus d'échantillons que la moyenne (centre). Cela met en évidence les sauts dus à la répétition des mêmes éléments pour se conformer à un nombre d'échantillons donnés. En bas, une normalisation simultanée de l'amplitude et du temps sur moins d'échantillons que la moyenne compressant les signaux tout en réduisant le détail.

### 4.3.3 Identification par multiplication

Cette méthode se base sur la connaissance préliminaire de modèles de pas avant, arrière et latéraux pouvant être obtenus grâce à une phase de calibrage. Une fois les motifs déterminés, le signal antéro-postérieur est normalisé. Chaque pas est ensuite confronté aux modèles afin de déterminer lequel des résultats de la multiplication est le plus important.

Celui-ci distingue le type de pas en présence comme illustré à la figure Fig. 4.5. Cette approche, très simple en soi, reste très sensible à une mauvaise normalisation des pas et nécessite un calibrage préalable.

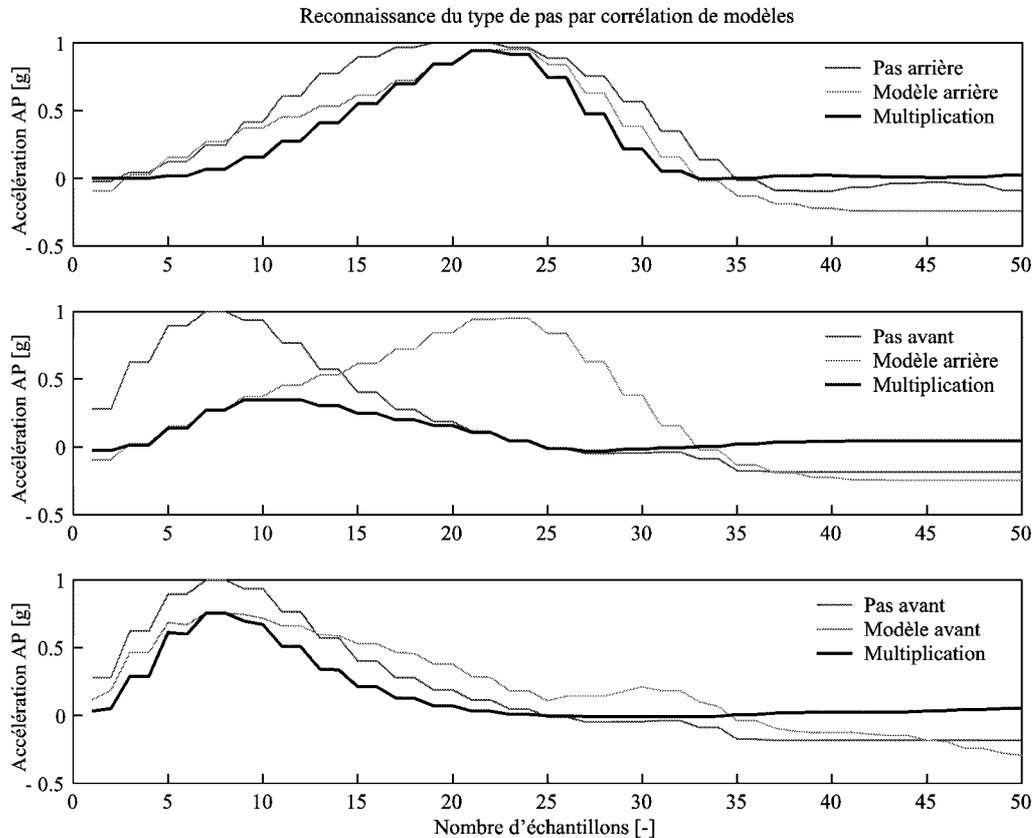


FIG. 4.5 – Reconnaissance du type de pas par corrélation de modèles. Cette méthode fournit de bons résultats pour la marche avant-arrière. Le principe se base sur celui de la corrélation fournissant un score élevé si les deux signaux sont en accord. La superposition temporelle des extrema avec le score maximal détermine le type de pas.

#### 4.3.4 La méthode des pentes

Considérant l'allure générale des signaux accélérométriques, il est possible d'identifier les pas comme une succession de paires de triangles rectangles. En comparant les pentes de ceux-ci on établit l'appartenance de l'occurrence à telle ou telle catégorie de pas. Comme l'usage de seuils pour les pentes requiert des valeurs propres à chaque individu, le rapport des deux pentes permet de s'affranchir de cette limitation. Cette méthode sans normalisation ni calibrage s'applique aussi bien aux signaux latéraux, figure Fig. 4.6, qu'antéro-postérieurs. Une fois l'occurrence *pas* identifiée, une validation est effectuée en considérant non pas l'aire sous la courbe accélérométrique, mais la *densité temporelle* de celle-ci. La notion de temps permet de s'affranchir d'une détection erronée de minima distants dont l'aire pourrait s'approcher de celle, plus resserrée dans le temps, de vrais pas.

Étant bien entendu que la probabilité qu'une personne marchant à vive allure effectue un pas latéral ou arrière est minimale, les différents modèles seront activés uniquement lors

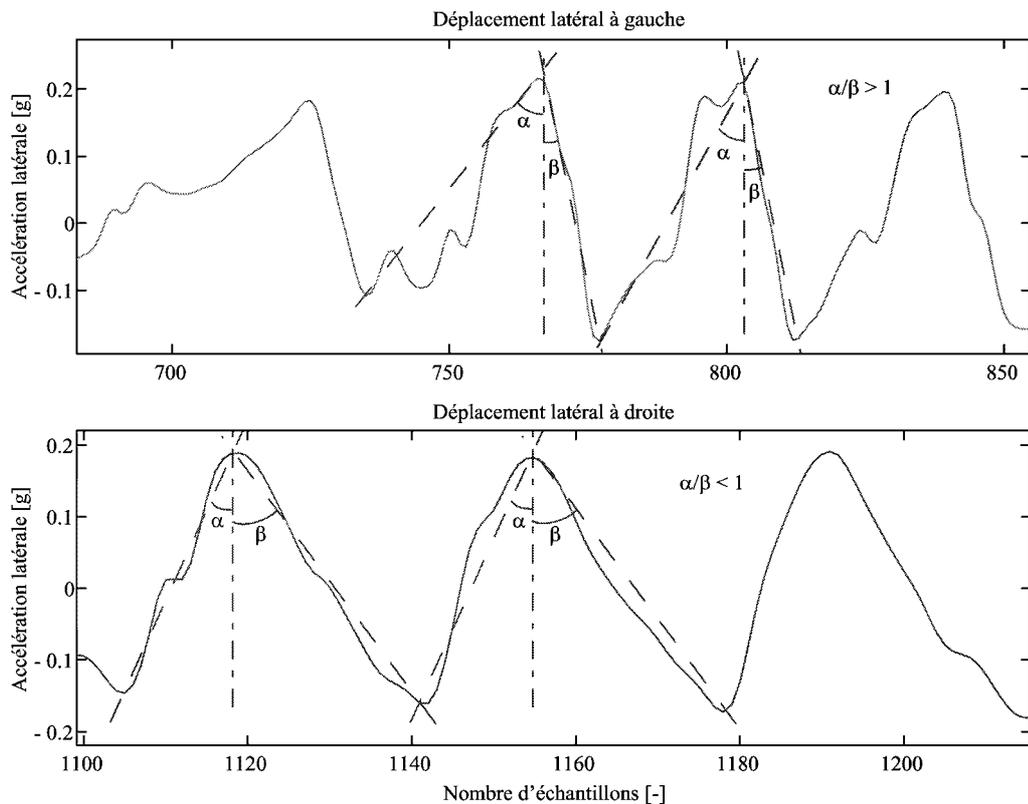


FIG. 4.6 – Reconnaissance du type de pas en considérant les pentes des différents triangles rectangles schématisant les pas. Cette méthode relativement robuste permet de s'affranchir de toute phase de normalisation et de calibrage en considérant uniquement le contenu accélérométrique de chaque signal.

de déplacements lents ou en phase d'arrêt. Les tests réalisés montrent que si la quasi totalité des pas sont détectés, leur classement se révèle ambigu lors des périodes de transition (avant-arrière, avant-gauche, ...). Le premier et le dernier pas sont souvent mal classés à cause de la faible amplitude du signal accélérométrique. Ils sont difficilement reconnaissables même à l'œil nu. Ceci apparaît a priori comme la limite de cette méthode d'analyse. Les distances réelles parcourues durant ces étapes de transition étant moindres, la conséquence sur la position n'est pas importante

Si la présence de motifs est indispensable à la détection de pas, la suppression de ces derniers par filtrage passe-bas est indispensable afin de définir l'attitude des capteurs. Cette étape est primordiale pour la projection du vecteur magnétique sur le plan horizontal. La notion de cycle de marche définie précédemment joue ici un rôle important. Lors d'une succession de pas gauche-droite-gauche ou droite-gauche-droite, on observe un dandinement naturel dont un cycle commence et se termine avec la même jambe. Le mouvement s'apparente, selon la position du capteur, au roulis, dont l'intensité varie en fonction de la personne et surtout du genre de celle-ci. Les résultats obtenus montrent en effet un mouvement des hanches plus important chez la gent féminine. A la fin de chaque cycle cependant, les capteurs retrouvent leur position initiale. Ceci laisse supposer que la moyenne des signaux verticaux et latéraux sur tout l'intervalle annule les composantes dues au mouvement. Les essais effectués montrent que ceci n'est que partiellement vrai car il n'est pas possible de retrouver les valeurs d'élévation et de tangage initiales. Il est néanmoins possible de corriger cet inconvénient par l'introduction d'un plan horizontal virtuel sur lequel

sera projeté le vecteur du champ magnétique.

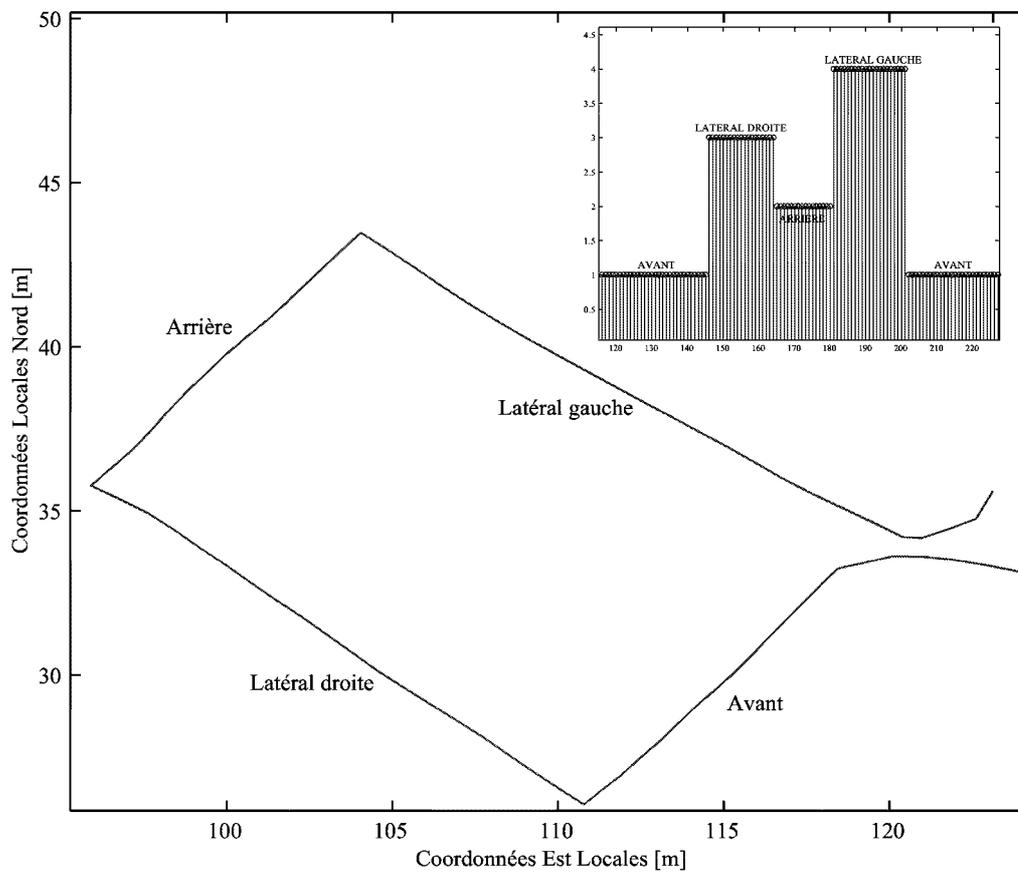


FIG. 4.7 – Détail de trajectoire où la personne se déplace dans les quatre directions de la marche en maintenant le corps fixe par rapport à une orientation. En plus de la détection de ces mouvements spécifiques, une correction sur l'azimut tenant compte de la rotation du corps doit être automatiquement ajoutée à l'azimut de déplacement mesuré. L'écart de fermeture à la fin des 62.3 m de parcours est de 1.7 m (2.7%). La méthode de détection utilisée permet donc de maintenir une précision comparable à celle obtenue lors de la marche avant uniquement.

#### 4.3.5 Plan horizontal virtuel pour la détermination de l'azimut de déplacement

A l'échelle de la navigation pédestre, le champ magnétique terrestre peut être considéré comme relativement uniforme et constant. Exception faite des perturbations magnétiques, la norme du vecteur est constante aussi bien dans l'espace que dans le plan horizontal. En partant du principe, dicté par le bon sens, que l'azimut de marche est constant durant chaque pas, les composantes magnétiques sont moyennées durant cette durée. Une fois cette étape réalisée, le vecteur est projeté dans le plan horizontal au moyen des angles d'attitude calculés. Comme mentionné sous (Eq. 3.11), l'élévation et le tangage ne sont pas toujours déterminés de manière précise, impliquant de fait une erreur d'azimut dépendante du cap poursuivi. Cette erreur peut être rectifiée en ajoutant comme termes correctifs des valeurs prenant en compte la dynamique de la marche. On définit ainsi un plan horizontal

virtuel sur lequel se projette le vecteur magnétique une fois la personne en mouvement. Les valeurs de roulis et tangage définies ne reflètent en rien l'attitude réelle du capteur mais sont dépendantes du style de marche de la personne. Une fois calculées durant la phase de calibrage, ces corrections peuvent être considérées comme constantes dans le temps.

Cette relation s'explique de la manière suivante. En moyennant les signaux accélérométriques durant un cycle de marche, on veut annuler la signature des mouvements. De par les amplitudes présentes, ce scénario est trop optimiste, les angles d'attitude calculés représentant plus la variation d'attitude depuis le début jusqu'à la fin du pas que l'attitude absolue. Il s'agit en quelque sorte d'un mouvement relatif à l'attitude stable du capteur lorsque la personne est immobile. L'ajout des termes correctifs issus de la phase d'initialisation permet donc d'obtenir l'attitude absolue et ainsi de corriger les défauts d'horizontalité virtuels dus au déplacement.

Une fois un azimut attribué à chaque pas, la trajectoire de la personne est construite comme une succession de points lancés. Cette dernière peut encore être améliorée si l'on filtre les azimuts calculés en tenant compte du mode de déplacement généralement utilisé par les personnes. Si l'on analyse les déplacements quotidiens, ceux-ci sont principalement composés de longs bouts rectilignes entrecoupés de virages. Les variations de direction s'opèrent de manière continue, régulière et se traduisant par des changements d'azimuts successifs doux, inférieurs généralement à  $20^\circ$ . Un filtre passe-bas *classique* (Kunt, 1980; Antoniou, 1993; Sterns et David, 1996) n'est toutefois pas judicieux car il exclurait implicitement l'existence de mouvements brusques tels que demi-tours, évitement d'une personne, etc. Le dessein est donc de filtrer le signal tout en préservant certaines hautes fréquences représentatives de ces situations particulières. Deux types de filtres différents ont été retenus concernant respectivement le post-traitement et les applications en temps réel.

### Le filtre de Savitzky-Golay pour une approche post-traitement

Le filtre de Savitzky-Golay (Bromba et Ziegler, 1981; Rompelman et Ros, 1986; Goovaerts et Rompelman, 1991; Orfanidis, 1996), également connu comme lisseur polynomial, est un filtre à réponse impulsionnelle finie, couramment utilisé en spectrométrie. S'il préserve mieux le contenu haute fréquence que les filtres moyennants classiques (moyenne mobile ou moyenne mobile pondérée), le signal final est malheureusement plus bruité. Il peut être défini comme l'ajustement d'un polynôme de différents degrés à un set de mesures. Cela signifie que le filtrage conservera exactement tout signal polynomial de même degré ou inférieur.

Dans la pratique, comme le filtre est symétrique de longueur  $N = 2 \cdot M + 1$ , il faudra attendre les  $M$  premières valeurs avant de pouvoir calculer le premier résultat lissé. L'hypothèse est faite bien que la taille des données soit toujours supérieure à  $N$ . Le retard du filtre est alors de  $M$ . Durant la période d'état stable, le résultat du filtrage s'écrit

$$y(n) = \sum_{m=-M}^M b_0(m) \cdot x(n+m) = \sum_{m=-M}^M b_0(-m) \cdot x(n-m) \quad (4.5)$$

où  $b_0$  est le vecteur des coefficients du filtre dépendant du degré  $d$  du polynôme et de la longueur de celui-ci. Le calcul de  $y(n)$  requiert donc  $M$  valeurs avant et après  $x(n)$ . Lorsque cette affirmation n'est pas vérifiée, des valeurs de transition sont calculées pour le

vecteur  $b$ . La figure Fig. 4.8 illustre les principes de transition et de continuité. L'utilisation

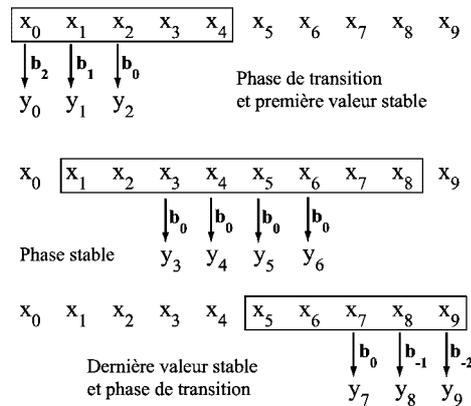


FIG. 4.8 – Phases de transition et stable pour un filtre Savitzky-Golay où  $N = 5$  et la taille totale de l'échantillon est de 10. Le retard du filtre est ici de 2 pas.

d'un filtre symétrique trouve également sa justification dans le fait que chaque pas d'une trajectoire est influencé par les pas précédents et influencera les suivants. Lors d'une analyse continue, les périodes de transition n'apparaissent qu'au début et à la fin de la période de mesures. Dans l'approche retenue, chaque arrêt occasionne une phase de transition. En effet, une personne peut pivoter sur elle-même librement sans pour autant effectuer de pas. Considérer ensuite le nouveau départ dans la continuité de la direction calculée lors de l'arrêt est bien trop restrictif. La figure Fig. 4.9 présente une trajectoire obtenue en filtrant l'azimut sur un fenêtre de 10 pas avec un polynôme du deuxième degré.

### Le filtre exponentiel pour une approche temps-réel

Contrairement au filtrage en post-traitement où il est possible de tirer avantage de l'information disponible suivant l'événement, l'approche temps réel considère uniquement les valeurs précédentes le moment présent. Le défi est d'en extraire le maximum d'information afin de corriger ou d'améliorer les mesures effectuées.

L'obtention d'un azimut filtré en temps réel fait souvent appel à la théorie des filtres de Kalman (Gelb, 1971; Maybeck, 1994; Grewal et Andrews, 1993). Ce choix n'a pas été adopté ici pour les raisons suivantes. L'étape de prédiction du filtre fait l'hypothèse implicite qu'il est possible de prévoir à un moment  $t$  l'azimut de déplacement d'une personne au temps  $t + 1$ . Ceci est vérifié lors de trajectoires rectilignes ou lorsque la personne doit suivre un itinéraire connu et fixé à l'avance. Il occasionne cependant des retards détériorant la représentation du parcours si la trajectoire est sinueuse. L'absence de dégradation de l'azimut pas après pas rend la présence d'un bruit système (process noise) inopportun et, par là-même nous fait renoncer à une telle approche.

Comme le ou les derniers pas influencent tout de même l'azimut de marche, ce lien sera garanti par l'utilisation de *filtres exponentiels*. Ceux-ci peuvent être considérés comme une évolution de la moyenne mobile où tous les éléments considérés ont le même poids. Cette caractéristique se justifie principalement pour des systèmes stables. Un filtre donnant plus de poids aux valeurs récentes sera de fait plus approprié pour des applications dynamiques. La justification mathématique se présente de la manière suivante.

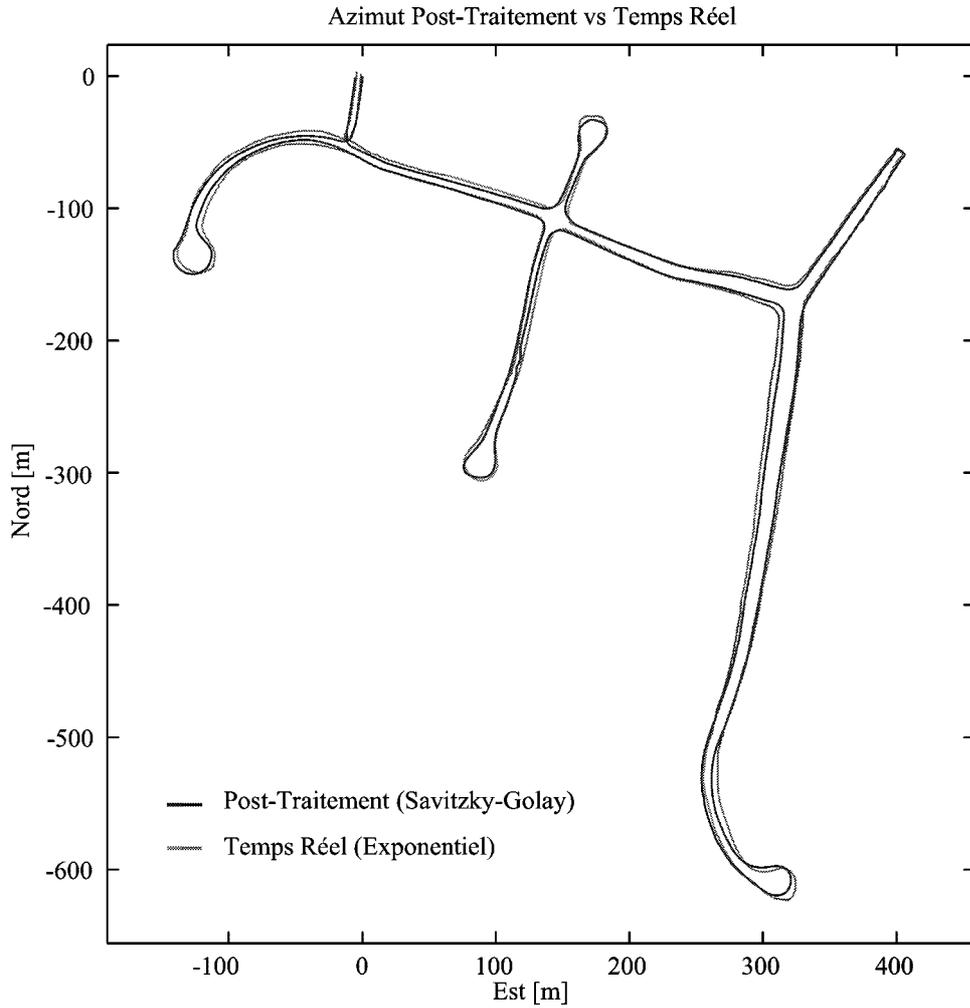


FIG. 4.9 – Comparaison des trajectoires obtenues en considérant deux approches différentes pour le calcul de l'azimut de déplacement. Le filtre de Savitzky-Golay considère en phase stable 10 pas et lisse l'azimut selon un polynôme du deuxième degré. Le filtre exponentiel utilisé pour le traitement en temps réel a comme paramètre  $\alpha = 0.02$

Soit  $\bar{x}_k$  la moyenne des  $n$  dernières valeurs de  $x$

$$\bar{x}_k = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=k-(n-1)}^k x_i \quad (4.6)$$

En ajoutant une valeur au calcul de la moyenne, (Eq. 4.6) devient

$$\bar{x}_{k+1} = \frac{1}{n+1} \cdot \left( x_{i+1} + \sum_{i=k-n+1}^k x_i \right) \quad (4.7)$$

D'après (Eq. 4.6) nous avons  $n \cdot \bar{x}_k = \sum_{i=k-n+1}^k x_i$  et en le remplaçant dans (Eq. 4.7)

$$\bar{x}_{k+1} = \frac{1}{n+1} \cdot x_{k+1} + \frac{n}{n+1} \cdot \bar{x}_k \quad (4.8)$$

En simplifiant par  $\alpha = \frac{n}{n+1}$ , le filtre exponentiel s'écrit

$$\bar{x}_k = (1 - \alpha) \cdot x_k + \alpha \cdot \bar{x}_{k-1} \quad (4.9)$$

En développant récursivement (Eq. 4.9), on constate que le poids donné à chaque azimut diminue exponentiellement à mesure que l'on recule dans la trajectoire.

$$\bar{x}_k = (1 - \alpha) \cdot x_k + \alpha(1 - \alpha) \cdot x_{k-1} + \alpha^2(1 - \alpha) \cdot x_{k-2} + \dots \quad (4.10)$$

La constante  $\alpha$  indique le degré de filtrage, c'est à dire l'inertie du filtre. Une valeur proche de 1 signifie que le nouvel azimut calculé n'influencera pratiquement pas le calcul de la moyenne. De manière opposée, une valeur de  $\alpha$  proche de 0 signifiera qu'aucun filtrage n'est réalisé. Il est intéressant de remarquer la similarité avec le filtre de Kalman où  $\alpha$  joue le rôle de la matrice de gain  $K$ , et où toute l'information fournie par les valeurs passées se trouve résumée dans  $\bar{x}_{k-1}$ . La différence majeure est cependant que le gain  $\alpha$  reste constant, indépendamment de la précision des mesures.

Si des connaissances a priori sont disponibles sur la dynamique de marche de la personne, le degré de filtrage peut être adapté en conséquence. En règle générale celui-ci varie proportionnellement à la fréquence des pas. Plus une personne avance rapidement, moins elle est encline à changer brusquement de direction et plus  $\alpha$  sera proche de 1. Si au contraire la cadence de marche est basse, la probabilité (de même que la possibilité physique) d'une variation d'orientation est plus élevée. Une telle situation force  $\alpha$  vers des valeurs proches de 0 afin que tout mouvement brusque soit immédiatement pris en compte. Si l'azimut est déterminé sur la base de plusieurs senseurs, comme c'est le cas au paragraphe 4.8.2,  $\alpha$  est fixé à 0 dès que le gyroscope détecte une vitesse angulaire synonyme de virage. Ceci permet de s'approcher autant que possible de la valeur vraie du virage, sans effet de lissage jouant cette fois un rôle négatif.

## 4.4 Procédure de calibrage

Conséquence des perturbations magnétiques induites par les habits et les différents accessoires qu'une personne porte sur elle, une phase de calibrage du système est nécessaire. Idéalement, celle-ci doit non seulement annuler les perturbations permanentes douces et fortes, mais également considérer le mode de marche du piéton. Deux étapes, l'une statique et l'autre en mouvement seront donc essentielles au calibrage du compas magnétique. Durant cette période, et profitant d'un scénario déterminé, différents seuils pour la détection des déplacements sont initialisés. La procédure de calibrage est la suivante.

1. La personne effectue un tour complet sur elle-même. Aucun mouvement synonyme de déplacement ne devant être détecté, les seuils sur les signaux accélérométriques seront

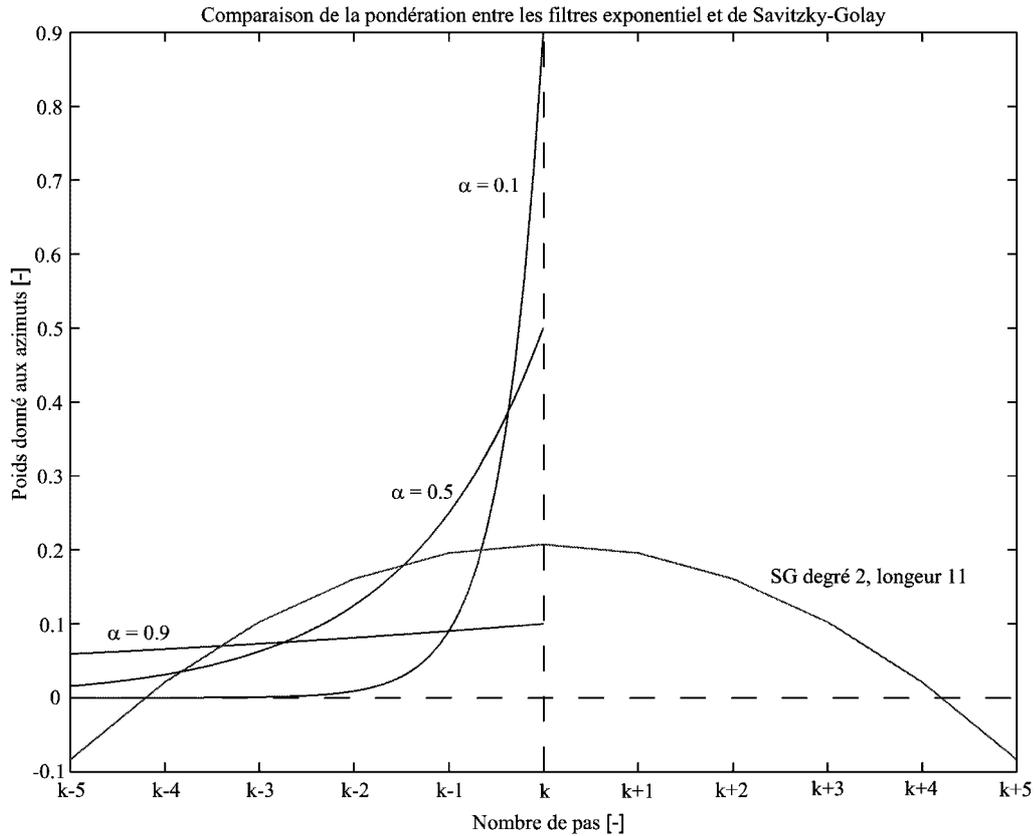


FIG. 4.10 – Représentation des différents coefficients de pondération en fonction du type de filtre et de paramètre utilisés. Pour des grandes valeurs de  $\alpha$  le filtre exponentiel s'approche d'un filtre à réponse impulsionnelle finie. En phase stable, le filtre de Savitzky-Golay est lui symétrique par rapport à l'époque considérée, donnant dans le cas présent autant de poids aux valeurs précédant que suivant l'azimut calculé.

fixés en conséquence. Une fois cette étape réalisée, l'intensité du champ magnétique corrigée est constante sur tout le tour d'horizon.

2. L'individu réalise une série d'aller-retours dans différentes directions. L'expérience montre qu'en décrivant une demi-étoile de 5 branches d'environ 10 pas et séparées de  $45^\circ$  chacune, le roulis et le tangage virtuels présentent de bonnes valeurs approchées, Fig. 4.11. Ces défauts apparents d'horizontalité provoquent la divergence de la trajectoire du retour par rapport à celle de l'aller. La moitié de l'erreur angulaire considérée correspond au défaut d'attitude réparti sur les deux angles. Les valeurs sont calculées par compensation paramétrique (Merminod, 2000), cf (Eq. 4.11) et un minimum de deux directions est cependant nécessaire pour initier les itérations.

$$\begin{bmatrix} \frac{d\alpha_1}{2} \\ \frac{d\alpha_2}{2} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & -\sin \alpha_1 \\ \cos \alpha_2 & -\sin \alpha_2 \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta Tangage \\ \delta Roulis \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Comme le montre le tableau Tab. 4.2, ces valeurs restent passablement constantes si les senseurs ne bougent pas durant les essais. Cette remarque garde sa valeur pour tout enclenchement et déclenchement du système mais elle n'est pas vraie une fois le compas enlevé de la place originale. Il est important de remarquer que le calibrage peut se réaliser sans

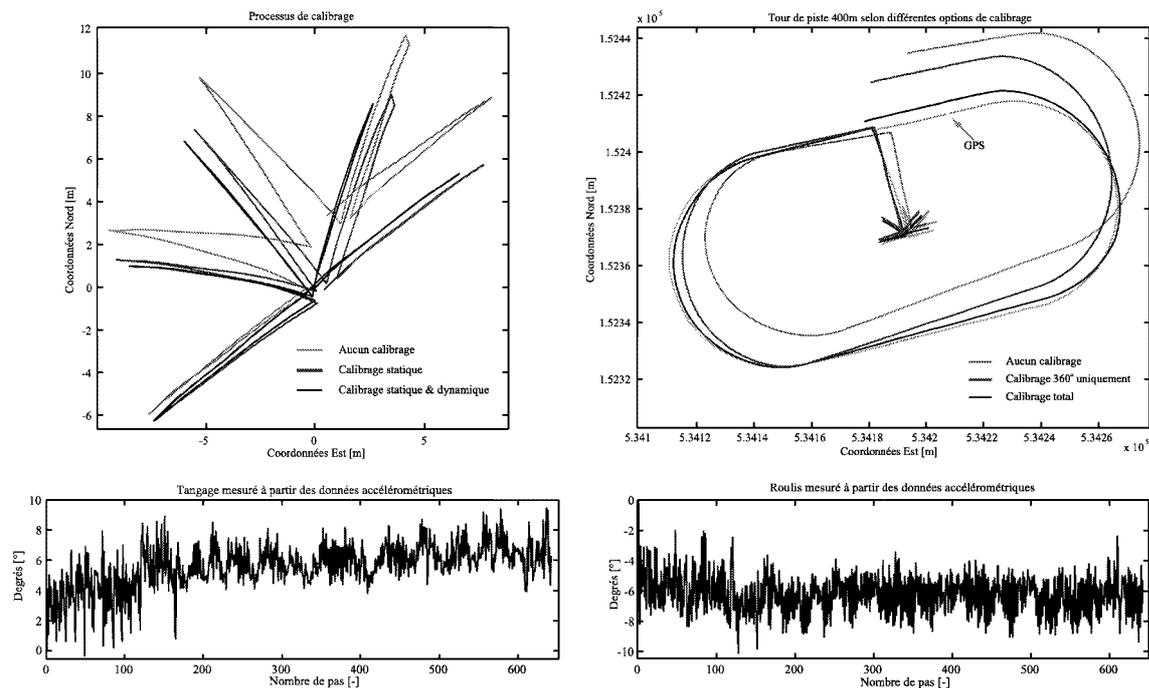


FIG. 4.11 – Différents scénarios pour le calibrage des valeurs de roulis et de tangage additionnelles causées par la marche. Les effets sur la trajectoire sont présentés pour un tour de piste olympique de 400m. La partie inférieure présente les valeurs de ces angles calculées à chaque pas à partir des signaux accélérométriques propres. Les valeurs constantes optimales de  $1.48^\circ$  pour le tangage et  $2.92^\circ$  pour le roulis proviennent du calibrage en demi-étoile calculé par (Eq. 4.11). En observant les angles d'attitude calculés instantanément en utilisant uniquement les signaux accélérométriques disponibles, on remarque qu'il n'est pas possible de retrouver les valeurs provenant du calibrage. Cette constatation confirme la pertinence un d'calibrage initial.

mesures satellitaires. Si la visibilité est suffisante, les positions absolues calculées servent à déterminer l'erreur d'alignement ainsi qu'à ajuster les modèles physiologiques.

Trajet [#]	Distance [m]	Distance vraie [m]	Roulis [°]	Tangage [°]	Fermeture [m]-[%]
1	1112.31	1109.81	6.32	-0.51	18.71 (1.6)
1	1115.27	1109.81	6.29	-0.59	6.41 (0.6)
1	1110.45	1109.81	6.47	-0.65	14.22(1.3)
1	1108.74	1109.81	6.57	-0.46	3.27 (0.3)
1	1099.01	1109.81	6.38	-0.26	24.11 (2.2)
2	541.95	557.84	1.48	2.92	7.45 (1.3)
3	3476.12	3512.14	10.51	-3.47	21.16 (0.6)
4	780.40	764.12	4.5	1.01	5.21 (0.7)
5	243.12	238.07	6.37	-2.78	4.04 (1.7)

TAB. 4.2 – Valeurs des différents angles d'attitude virtuels (roulis et tangage) causés par la dynamique de la marche et obtenus par calibrage. Pour un même parcours et une même personne, ces valeurs sont très proches alors qu'elles varient énormément d'un individu à un autre (trajets 2 à 5). Les écarts de fermeture minimes obtenus suite à ce calibrage tendent à prouver la pertinence de ce dernier.

## 4.5 L'intégration de mesures satellitaires

L'intégration de données GPS permet non seulement un positionnement absolu de la personne, mais également le calibrage du modèle de marche ainsi que du défaut d'alignement du module de mesure. Il existe de nombreuses variables ainsi que différents messages proposés par les récepteurs GPS commerciaux. Dans l'intention de rester le plus ouvert possible à toute architecture de système dans lequel le module de navigation à l'estime ne serait qu'une composante, seule l'information contenue dans les messages au format standard NMEA-0183 (National Marine Electronics Association<sup>1</sup>) sera utilisée. Les positions GPS sont considérées utilisables si elles ont été calculées avec un minimum de 4 satellites et si le HDOP présent dans le message GGA est inférieur à 5.

À ce stade, il est nécessaire de distinguer deux approches différentes mais pouvant être utilisées en toute complémentarité. La première considère que les signaux satellitaires sont disponibles en continu durant une période suffisamment longue alors que dans le second scénario, seule une position peut être calculée occasionnellement.

Si, par chance, la première situation se présente, les paramètres des équations (Eq. 2.5) et (Eq. 2.7) seront mis à jour. La vitesse ainsi que la distance cumulée mesurées par satellites permettent une adaptation de ces valeurs. Le défaut d'alignement pourra également être déterminé grâce aux positions absolues considérées. La figure Fig. 4.12 présente le processus réalisé dans le choix du modèle utilisé pour la modélisation des enjambées. Selon la fréquence du signal satellitaire, tout changement dans la dynamique de marche, pouvant être reflété par une inadéquation du modèle utilisé, sera plus ou moins rapidement détecté et corrigé.

La deuxième situation est la plus commune à la navigation urbaine et forestière ou à la marche le long des trottoirs ainsi que sous un feuillage dense, impliquant une visibilité du ciel très restreinte. La problématique est donc de corriger les différents paramètres des modèles à partir de seulement deux positions connues. Si le système à résoudre est mathématiquement singulier, il est toutefois possible d'en extraire empiriquement le maximum d'information. Dans un premier temps, les paramètres de (Eq. 2.5) peuvent être maintenus constants, supprimant de fait toute singularité. La distance GPS mesurée est ici une distance plane (à vol d'oiseau) qui ne tient aucun compte du trajet effectué pour arriver à ce point. La comparaison entre les distances cumulées, obtenues lors de la navigation à l'estime et utilisées dans la première méthode, et les distances planes n'a donc pas de sens. Le paramètre  $a$  de (Eq. 2.7) sera donc mis à jour en tenant compte de la différence de distance plane entre la position GPS et la position de navigation à l'estime rapportée au nombre de pas effectués.

Un indicateur de distance parcourue prenant en compte les composantes Nord-Sud et Est-Ouest depuis les dernières coordonnées connues permet de déterminer la validité ou non de la mise à jour des paramètres. Celui-ci permettra de comparer l'orientation générale du parcours au cap défini par le vecteur GPS. Si les deux orientations sont similaires, la valeur  $a$  puis les autres paramètres sont ajustés. Si il y a divergence, cela signifie que les positions GPS seules ne sont pas représentatives du chemin effectué et les différents paramètres restent inchangés. Le défaut d'alignement est logiquement la différence d'azimuts obtenue entre les positions GPS et les extrémités de la trajectoire à l'estime. Selon l'emplacement et la superficie couverte lors du déplacement, la déclinaison magnétique est modélisable

---

1. <http://www4.coastalnet.com/nmea/>

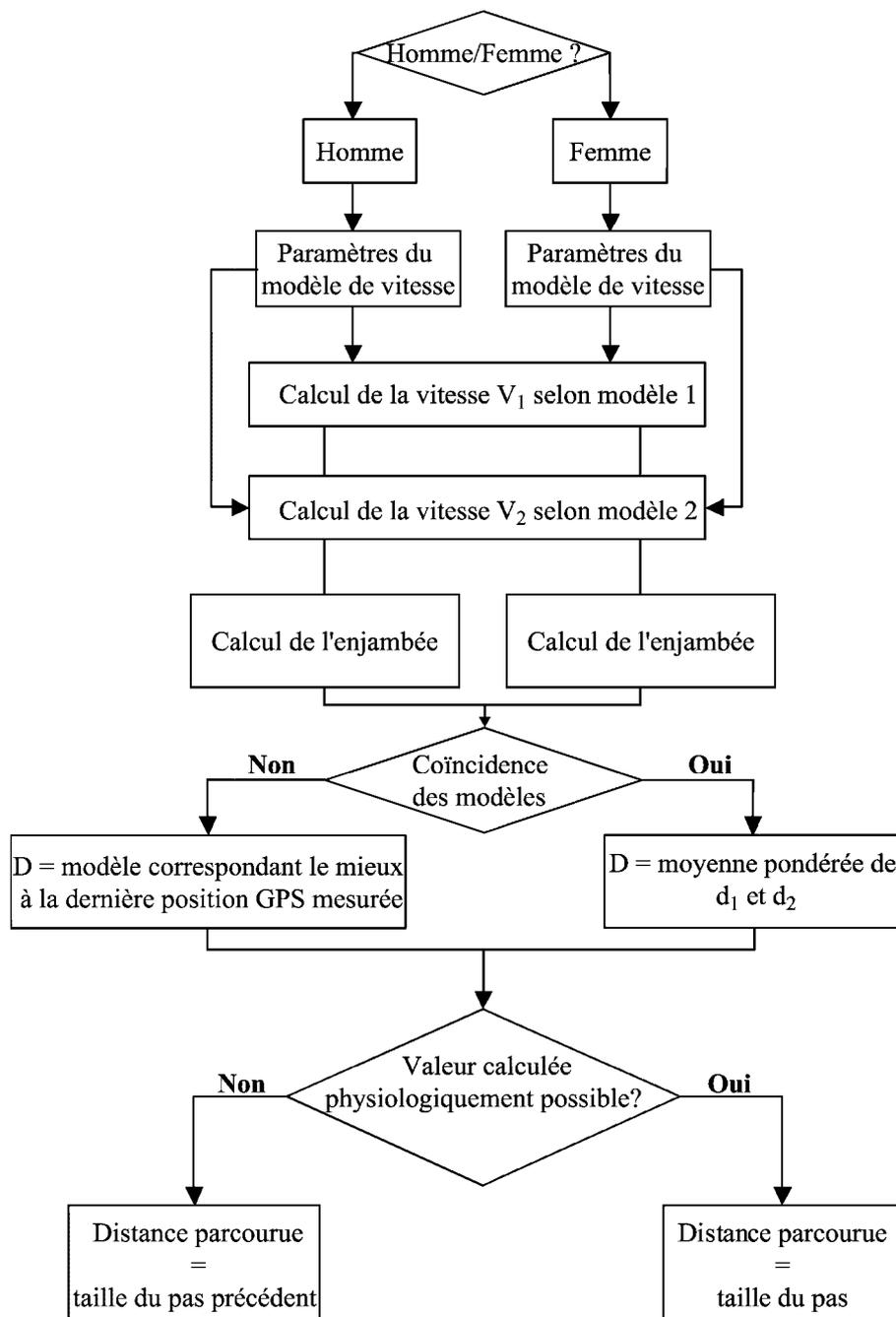


FIG. 4.12 – Optimisation et contrôle de la taille des pas. Selon différentes caractéristiques et paramètres physiologiques, différents scénarii sont applicables dans le calcul des enjambées. La procédure tient compte de la disponibilité intermittente des signaux satellitaires.

temporellement et localement, comme c'est le cas pour la Suisse (Eq. 4.12).

$$D(x,y,t) = A + B \cdot x + C \cdot y + \alpha \cdot [1 + b \cdot x + c \cdot y] \cdot f_D(t) \quad (4.12)$$

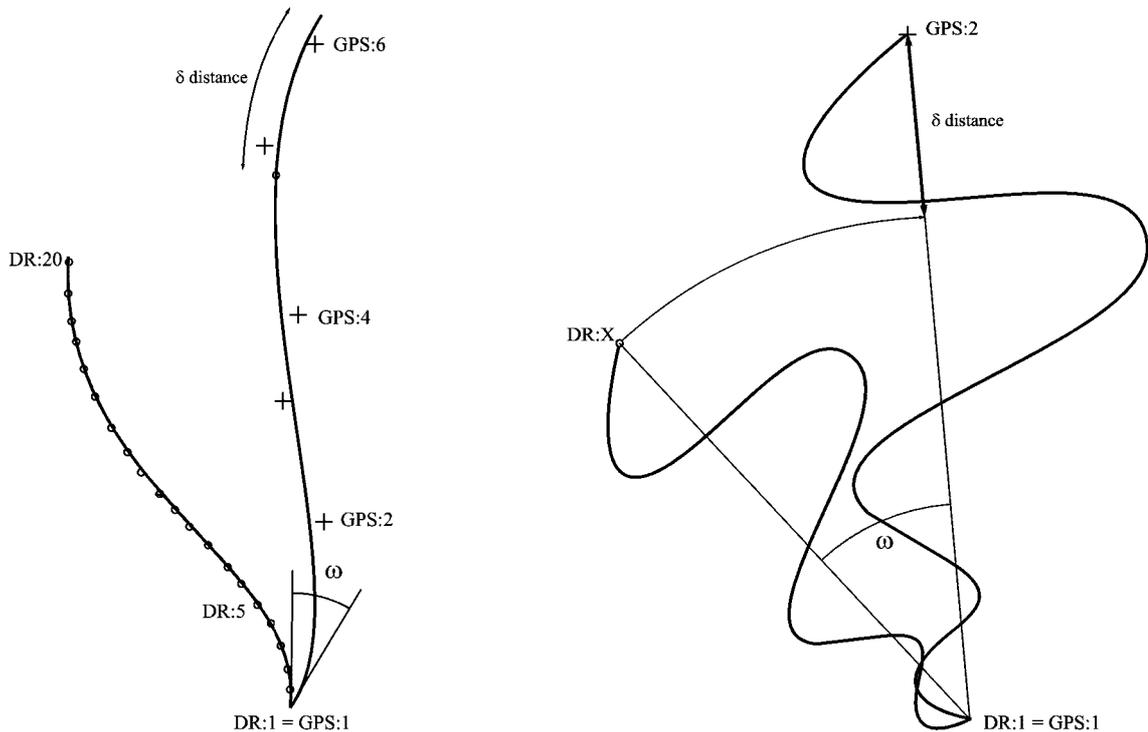


FIG. 4.13 – L'intégration des mesures satellitaires GPS est différente selon la disponibilité de celles-ci. Dans le cas continu, les différents paramètres sont mis à jour dès que suffisamment de données sont disponibles (gauche). Si le GPS n'est disponible qu'occasionnellement, le maximum d'information sera déduit de deux positions successives (droite).

L'évolution temporelle est prise en compte par

$$f_{D,I,F}(t) = \frac{t + \beta_{D,I,F} \cdot t^2}{1 + \gamma_{D,I,F} \cdot t} \quad (4.13)$$

où  $t$  est le temps écoulé depuis la dernière période de mesure,  $x$  et  $y$  sont les coordonnées nationales civiles suisses. Les divers coefficients sont eux aussi calculés annuellement (Fischer et Schnegg, 1994; Schnegg, 1999). Si la déclinaison est inconnue, celle-ci sera automatiquement prise en compte mais noyée dans le défaut d'alignement. Des modèles magnétiques mondiaux de précision variable sont cependant disponibles auprès de l'American National Geophysical Data Center<sup>2</sup>.

De par la précision désirée ( $1^\circ$ ), une distance minimale de 200 m est requise entre deux positions GPS. Cette distance atteint théoriquement plus de 3 km si l'on désire des paramètres pour le modèle de pas d'une précision de 3 cm. Les essais réalisés ont montré cependant qu'en mettant à jour simultanément les deux paramètres dès 200 m déjà, la qualité des mesures permettait d'obtenir des modèles corrigés très proches de la réalité. Cette distance de calibrage dépend également directement du type de récepteur GPS utilisé ainsi que du traitement des mesures effectué.

Cette approche se base sur deux hypothèses principales.

1. La valeur initiale du défaut d'alignement est connue à  $\pm 30^\circ$ . Ceci est généralement

2. <http://www.ngdc.noaa.gov/>

le cas au vu des limitations ergonomiques pour l'emplacement du senseur. Une incertitude plus importante peut causer de mauvais choix quant à la détermination ou non du biais, ainsi que des valeurs erronées de celui-ci.

2. Les perturbations magnétiques locales sont minimales ou compensées entre deux positions GPS. Les perturbations étant décelables, il est aisé de définir si celles-ci sont survenues durant la période considérée. Cependant, la présence ou l'absence d'un gyroscope influence le processus. Si c'est le cas, la valeur est intégrée automatiquement au set considéré pour la détermination du nouveau biais. Dans le cas contraire, le poids de la nouvelle valeur est réduit artificiellement en fonction de l'importance de la zone perturbée.

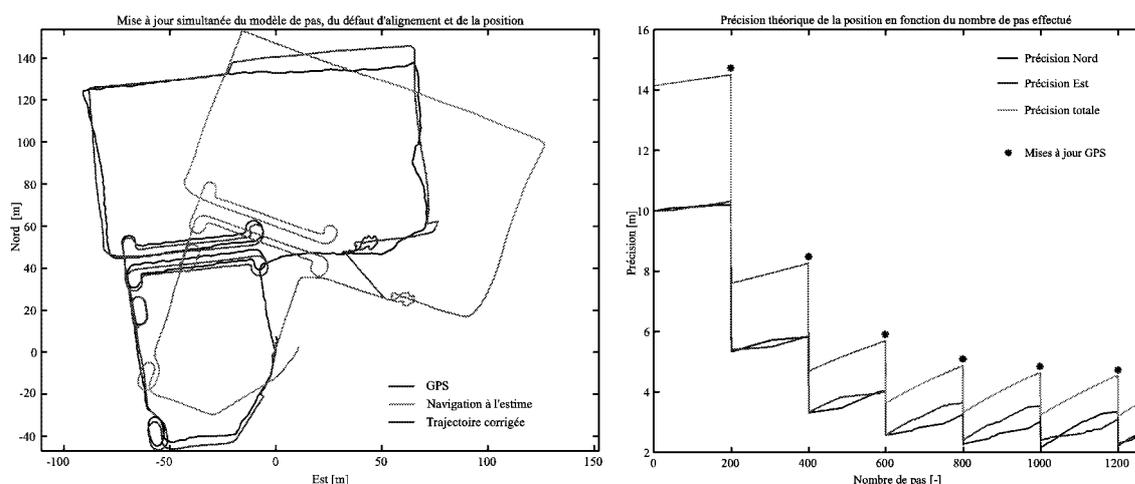


FIG. 4.14 – Correction d'une trajectoire lorsque les signaux GPS ne sont que ponctuellement disponibles. Le biais ainsi que la position sont directement corrigés dès la première position satellitaire. Le modèle de pas adapte ses paramètres plus lentement en réduisant progressivement le facteur d'échelle entre la trajectoire à l'estime et les positions GPS (gauche). La précision de la trajectoire (droite) fait ressortir l'importance des corrections GPS. Le couplage de plusieurs senseurs permet effectivement d'améliorer la précision obtenue par chacun d'eux considérés séparément.

Lors du post-traitement, un lissage peut être effectué. La répartition des écarts de fermeture en coordonnées, proportionnellement au cumul des enjambées, est l'option retenue. Bien que cet ajustage présente des effets illogiques selon l'orientation des segments considérés, il n'en reste pas moins très performant et adapté à ce mode de déplacement. En effet, comme l'erreur sur l'azimut est directement dépendante de l'azimut lui-même, (Eq. 3.10), il faudrait tenir compte de l'orientation du segment dans la répartition des erreurs. Cette méthode, bien que théoriquement correcte, se révèle fort compliquée et difficilement justifiable pour le gain de précision obtenu. Elle suppose également la connaissance des erreurs d'attitude précises sur tout le trajet, ce qui n'est pas le cas.

## 4.6 Reproductibilité des trajectoires

La notion de reproductibilité ou de répétition d'une trajectoire joue un rôle primordial dans certaines applications relatives à la navigation pédestre. Revenir sur ses pas ou effectuer un trajet défini pouvant être enregistré dans une base de données, nécessite une

distinction entre deux caractéristiques attribuables à des résultats: leur reproductibilité et leur représentativité vis à vis de la réalité.

Dans le premier cas, seule la possibilité d'obtenir  $n$  fois le même résultat lors de  $n$  parcours différents est d'intérêt. Une concordance avec le trajet réellement effectué n'est que secondaire. Dans le second cas, incluant de fait le premier, il est primordial que l'itinéraire calculé soit le reflet aussi exact que possible de la réalité. Selon une nécessité de l'information en temps réel ou en post-traitement, le facteur d'échelle et le biais éventuels jouent des rôles plus ou moins importants. La stabilité des algorithmes développés a été mise à l'épreuve sur plus de 200 km de parcours dans différentes conditions: à l'intérieur et à l'extérieur de bâtiments, sur route, sable, neige ainsi qu'en forêt clairsemée.

Tous les résultats mettent en exergue la variabilité temporelle imprévisible de la dynamique de marche d'une personne ainsi que les variations de paramètres qui en découlent. Considérant un même parcours, le nombre de pas accomplis peut varier grandement d'une itération à l'autre. Le tableau Tab. 4.3 montre ces variations pour un chemin de 3019 m le long d'une route résidentielle sans perturbations magnétiques notoires. Les 22 tests ont été effectués par la même personne sur une période de 5 mois. Les paramètres des différents modèles utilisés furent calibré durant le premier trajet et maintenus constants par la suite. On observe que le nombre de pas pour couvrir une même distance peut varier dans le cas présent de 3461 (-4%) à 4203 (+9%) pour une même personne par rapport à la valeur médiane de 3606. Les distances mesurées se trouvent toutes entre 2963 m (-1.8%) et 3110 m (+2.3%) pour une distance médiane de 3028 m. Les différences par rapport à la distance vraie s'étendent entre -56 m (-1.9%) et 91 m (+2%) pour une erreur médiane de 9 m.

Dans une deuxième étape, le paramètre  $a$  de (Eq. 2.7) fut modifié pour chaque test de façon à obtenir la distance correcte. Cette valeur varie dans le cas présent entre 0.31 et 0.33. Cela signifie que pour un modèle de pas optimal, une précision inférieure à 2 cm doit être atteinte pour le modèle général. Une telle exigence n'est cependant pas réaliste si l'on considère les variations de marche d'une personne, (Eq. 2.1) ainsi que les mesures disponibles pour le calibrage des paramètres. En recalculant les parcours avec comme fraction de pas constante la moyenne des valeurs  $a$ , les distances deviennent plus homogènes et les écarts de fermeture représentatifs uniquement des imprécisions d'azimut. Pour la navigation à l'estime, une valeur comparative de 5% de la distance parcourue entre les points de départ et d'arrivée est généralement acceptée comme erreur maximale autorisée. Avec des erreurs inférieures à 1% dans un milieu favorable, ceci justifie l'utilisation d'un compas magnétique pour une bonne stabilité et reproductibilité des trajectoires.

#### 4.6.1 Mécanisation totale ou approche événementielle?

Utilisant un système inertiel commercial de haute précision (Fig. 4.2), on procéda à une comparaison avec le produit développé, Tab. 4.4. Cela concerne tant les trajectoires proprement dites que la procédure d'emploi. Le module utilisé se compose de trois accéléromètres à pendules amortis à gaz ainsi que d'une triade de gyroscopes à laser en anneau, chargés de mesurer tout mouvement à une fréquence de 200 Hz. Les vitesses et positions sont calculées par mécanisation complète comprenant divers filtres de Kalman. Afin de maintenir une précision optimale et éviter toute divergence, des mises à jour à statiques (Zero Velocity Update - ZUPT) sont réalisées à des intervalles allant de trente secondes

N	# Pas	Distance [m]	Vitesse [m/s]	Distance corr. [m]	Erreur/pas [cm]	Fermeture [m]-[%]
1	3672	3017	5.84	3055	1	5.43 (0.2)
2	4203	3110	5.12	3056	0.9	13.24 (0.4)
3	3592	3032	5.91	3014	-0.1	2.32 (0.1)
4	3575	3028	5.98	3005	-0.4	27.66 (0.9)
5	3523	3010	6.14	3034	0.4	12.56 (0.4)
6	3733	2973	5.17	3021	0.1	4.23 (0.5)
7	3461	2986	6.41	3015	-0.1	13.69 (0.5)
8	3909	3086	5.20	3001	-0.5	9.88 (0.3)
9	3714	3068	5.74	3022	0.1	18.72 (0.6)
10	3589	3084	6.09	2995	-0.7	6.22 (0.2)
11	3626	3086	5.94	3007	-0.3	7.15 (0.2)
12	3621	3003	5.87	2994	-0.7	16.65 (0.6)
13	3695	3062	5.78	2999	-0.5	21.2 (0.7)
14	3540	3029	6.11	3017	-0.1	14.2 (0.5)
15	3646	2963	5.65	3013	-0.2	5.68 (0.2)
16	3732	3014	5.88	3037	0.5	14.23 (0.5)
17	3544	2996	6.20	3045	0.7	19.83 (0.7)
18	3544	2987	6.06	3018	-0	14.35 (0.5)
19	3573	3008	6.08	3019	0	7.86 (0.3)
20	3933	3072	5.16	2988	-0.8	11.24 (0.4)
21	3552	3056	6.04	3015	-0.1	6.37 (0.2)
22	3555	3045	4.71	3018	-0	8.95 (0.3)

Tab. 4.3 – Résultats de 22 tests réalisés par une personne sur un même trajet de 3019 m le long d'une route résidentielle. On constate de grandes variations dans le nombre de pas nécessaires pour couvrir la trajectoire. Ces variations sont prises en compte partiellement par le modèle de marche dont les paramètres, une fois moyennés, fournissent des résultats très proches de la valeur vraie (5<sup>ème</sup> colonne). Les erreurs de fermetures, inférieures à 1% de la distance parcourue, montrent la possibilité de retour au point de départ lors d'un trajet en milieu magnétiquement non perturbé.

à une ou deux minutes durant moins de dix secondes. Suite à la phase d'alignement nécessitant entre 5 à 10 minutes, le respect strict de la procédure permet de maintenir une précision décimétrique, voir centimétrique, sur des distances de quelques kilomètres. Du fait que le système ne prend en considération que les déplacements effectifs, le modèle utilisé est indépendant du type de sol, de l'environnement ainsi que des caractéristiques de marche de la personne. Les différents tests exécutés, Fig. 4.15, dans des conditions de travail standard, dessinent, au niveau de la précision comme de la fiabilité, la frontière entre *navigation* et *mensuration*. Si l'écart maximal entre les deux solutions reste toujours inférieur à 10 m, celui-ci ne peut être réduit assurément avec la méthode événementielle. Les arrêts répétés après chaque nombre fini de pas rend cependant la navigation difficile révélant les limites fonctionnelles, mais indispensables, de l'approche déterministe.

## 4.7 Aspects particuliers

Schématiquement, les actions lors d'un déplacement à pied peuvent être divisées en composantes simples telles que marche, virages et phases d'arrêt. Lors des nombreux essais

Mécanisation totale	Méthode événementielle
alignement	calibrage
distance = double intégration accélérométrique	distance = modèles physiologiques
dérive temporelle	dérive événementielle
précision indépendante de l'environnement	précision dépendant de l'environnement (perturbations magnétiques)
sac à dos, emplacement fixe	module amovible, emplacement "libre"
poids > 20 kg	poids < 200 gr
haute précision (1-10 cm), < 1 m garantie dans la majorité des cas	précision = f(distance) de l'ordre de 2-3% de la distance parcourue
calibrage à vitesse nulle fréquent (chaque 1-2 min)	aucune dégradation temporelle
coût élevé	coût faible (inférieur d'un facteur 100)
levé topographique de précision, gravimétrie	navigation, SIG

TAB. 4.4 – Comparaison de deux systèmes ainsi que des procédures de navigation. De par leurs spécificités respectives, le couplage de ces différentes approches permettrait sans aucun doute une simplification des procédures et/ou méthodes de mesures. La fusion permettrait également un rapport qualité-prix très attractif.

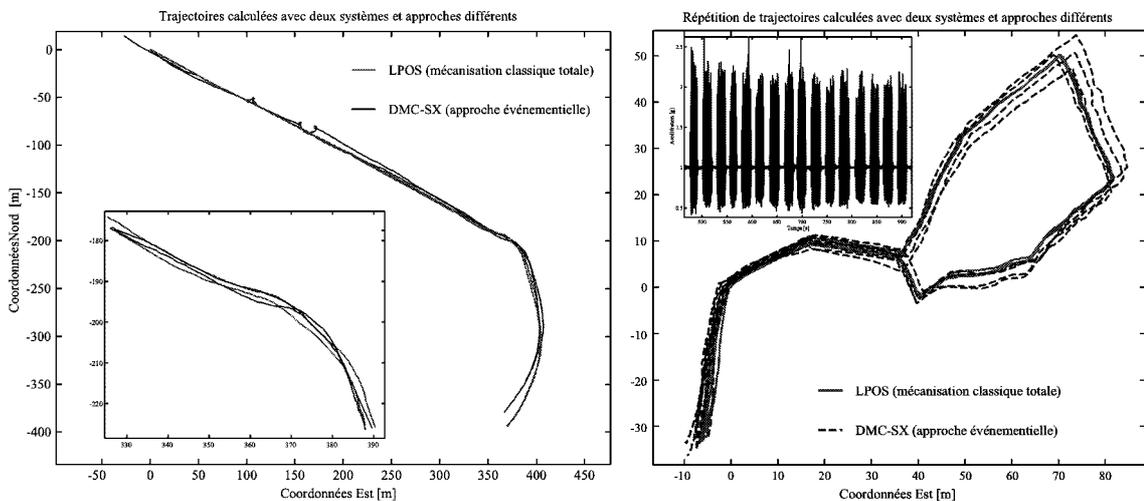


FIG. 4.15 – Comparaison des trajectoires obtenues en calculant les déplacements avec deux approches et systèmes différents. Les résultats obtenus avec la mécanisation totale sont considérés comme référence. La partie de gauche présente un trajet rectiligne aller-retour de 1'331.5 m. L'erreur de fermeture commise par l'approche événementielle est de 21.4 m (1.6%) contre -6.4 m (-0.5%) sur la distance. La partie droite illustre la répétitivité quasi parfaite de l'approche déterministe à l'inverse de son homologue présentant une dérive dans la succession des parcours. Sur 4 trajectoires de 304.8 m, la dispersion pour la distance parcourue est de 7.8 m (de 299.4 m à 307.2 m), soit une différence d'estimation de 2 cm/pas. Ce résultat est en accord avec les différents résultats obtenus sous (Eq. 2.1). L'erreur maximale par rapport à la distance vraie est de -5.4 m (-1.8%). L'encadré présente le signal accélérométrique vertical lors de la marche. Des mises à jour statiques de 10 s sont intercalées entre des périodes de déplacement de 30 s.

réalisés, différentes méthodes ont été développées afin d'améliorer les performances du système pendant la navigation à l'estime.

La première consiste en une diminution de la taille des pas lorsqu'un changement rapide de direction est détecté. En plus d'une justification planimétrique sur l'amélioration de la trajectoire, la biomécanique de la marche nécessite l'utilisation d'énergie pour le virage ce qui diminue d'autant celle nécessaire à une avance rectiligne. Pour des virages brusques, on observe que même si la personne effectue des pas, son centre de gravité peut être considéré comme immobile. La taille des enjambées calculées variera donc de manière inversement proportionnelle à la rapidité de changement de direction, et cela jusqu'à un seuil fixé empiriquement.

La seconde méthode concerne les cas particuliers où la personne cherche à revenir sur ses pas ou à suivre une trajectoire connue. Dans les deux occasions, les azimuts de marche sont comparés à des valeurs de référence. Si ceux-là sont considérés comme identiques, la nouvelle trajectoire sera ajustée par rapport aux différentes informations disponibles (positions, azimuts, ...). A cause des hypothèses retenues, assez contraignantes, il est nécessaire que le modèle appliqué soit suffisamment rigoureux, de manière à ce que toute divergence soit immédiatement détectée et judicieusement traitée (nouveau parcours, alarme, ...). A cette fin, la distance parcourue jointe aux différences d'azimuts sont analysées en permanence. Le schéma descriptif de la figure Fig. 4.16 explique la succession des traitements réalisés. Un exemple intégrant les deux démarches est présenté à la figure Fig. 4.17.

## 4.8 Gestion des perturbations magnétiques

Les perturbations magnétiques influençant grandement la qualité de l'azimut calculé avec le compas, une détection de celles-ci est nécessaire. Si elles sont identifiables grâce au champ magnétique en lui-même, l'utilisation simultanée d'un gyroscope permet de fournir un azimut fiable même en des endroits sensibles. Selon l'information et les données disponibles, divers traitements seront effectués, Fig. 4.18.

### 4.8.1 Optimisation de l'information magnétique

Le champ magnétique terrestre peut être considéré comme constant sur une zone couverte normalement par un piéton. Toute variation brusque du champ sera donc logiquement indicatrice d'une perturbation. Lorsqu'une personne se déplace, l'environnement dans lequel elle évolue change continuellement induisant des variations aléatoires du vecteur magnétique mesuré. Le filtrage passe-bas et l'approche pas-par-pas ont certes un effet moyenneur annulant la majeure partie de ces fluctuations, mais une oscillation est inévitable. Un seuil, au-delà duquel toute variation implique une perturbation, doit donc être fixé. Idéalement, cette valeur devrait être déterminée dans une zone neutre. Cette étape étant malheureusement dans la plupart des cas trop contraignante, une valeur empirique de  $3 \mu T$  a été retenue comme seuil d'anomalie sur l'écart-type du champ magnétique total durant trois pas.

L'effet d'une perturbation diminuant très rapidement avec la distance, la plupart de celles-ci ont un effet visible sur une dizaine de mètres seulement. Dans le cas des lignes à courant alternatif tels que bus, métro, les perturbations sont très fortes, mais heureusement bien marquées et rapides dans le temps. En maintenant constant le dernier azimut

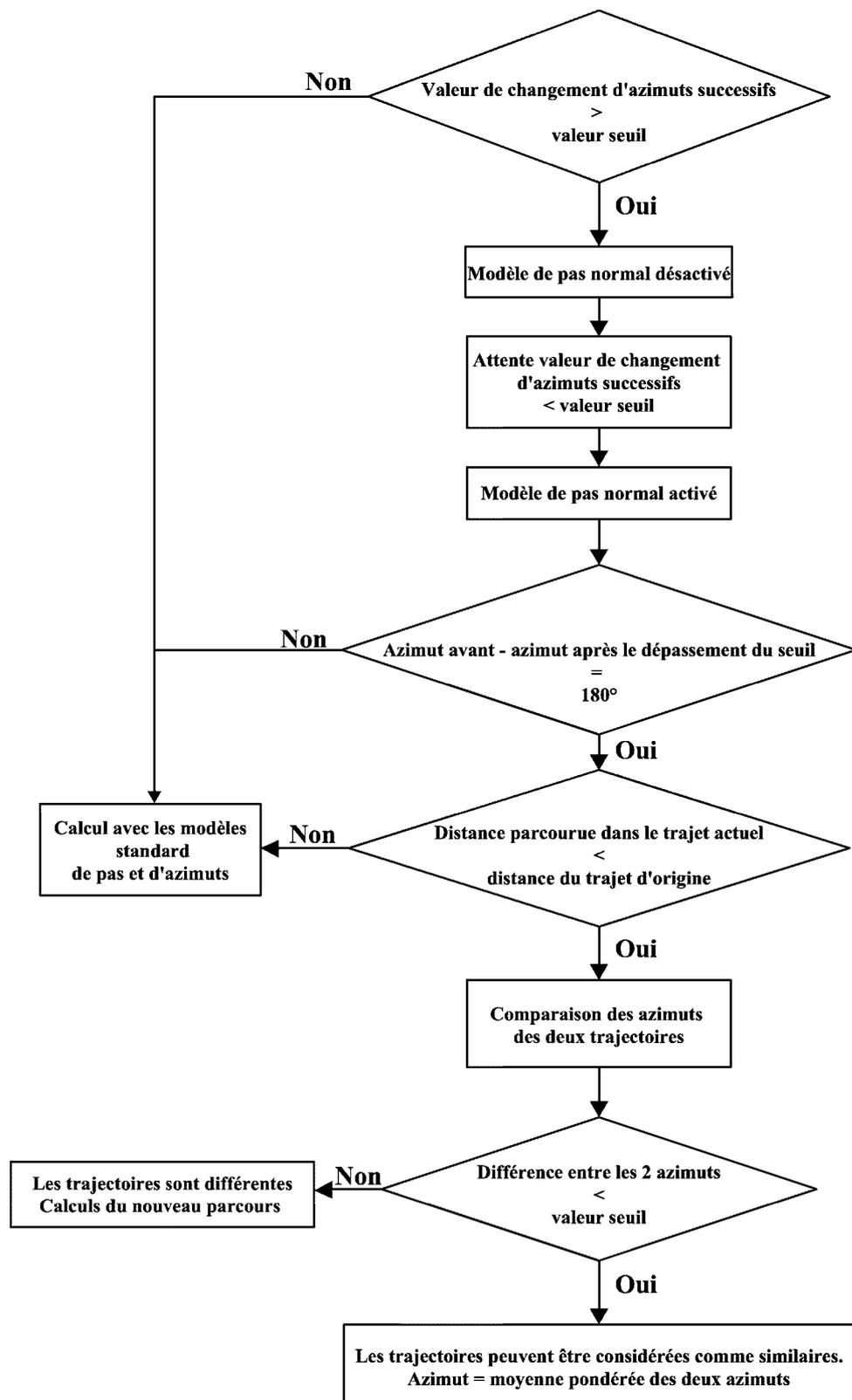


FIG. 4.16 – Procédure prenant en considération la diminution de la taille des pas lors de changements de direction rapides. Si un changement de 180° est constaté, l'hypothèse que la personne revienne sur ses pas est adoptée. Lorsque le trajet effectué est connu, une comparaison continue des azimuts a lieu afin de détecter toute divergence le plus rapidement possible.

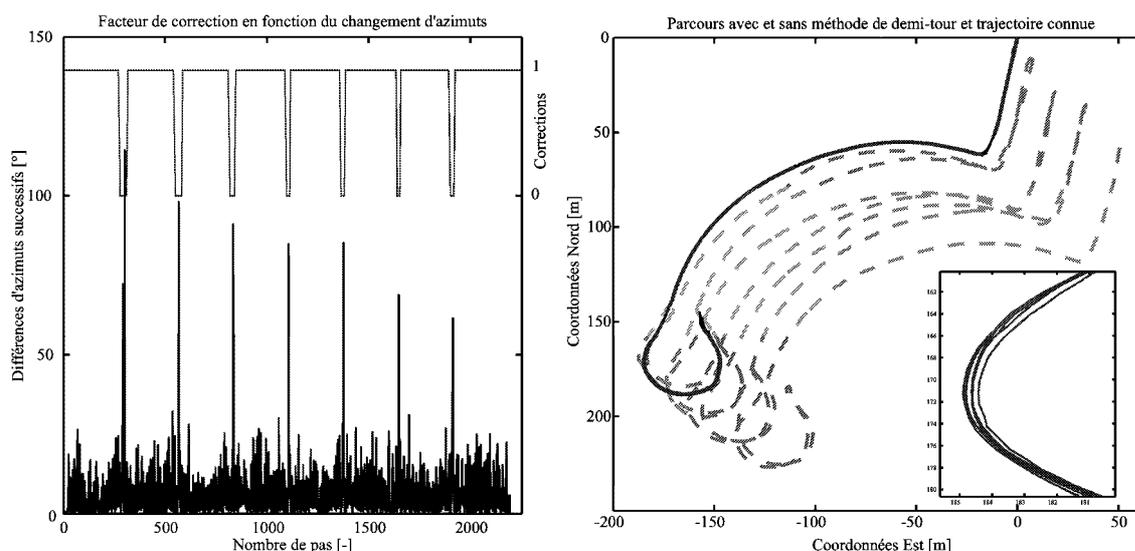


FIG. 4.17 – Lors d’une marche normale, l’oscillation de l’azimut causée par la marche elle-même avant filtrage est importante. Néanmoins, la détection de virages brusque est facilement réalisable. L’application de procédures particulières permet d’améliorer le calcul de la trajectoire. Avec une méthode appropriée, un écart de fermeture de 60m sur une distance de 2’430m c.à d. 2.5 % peut être réduit à 2.8 m soit 0.1% de la distance parcourue.

non perturbé durant l’intervalle nécessaire, l’erreur induite par cette simplification sera directement liée à la sinuosité du parcours effectué. Le temps et la distance parcourue de la sorte étant en règle générale courts, la trajectoire obtenue est significativement améliorée par rapport à une approche prenant en compte tous les azimuts calculés.

#### 4.8.2 Utilisation du gyroscope

Bien que l’azimut gyroscopique serve généralement de base à la navigation à l’estime, son usage servira ici seulement d’appoint au compas magnétique. En effet, la présence de perturbations magnétiques affectera le compas alors que le gyroscope demeurera, lui, non perturbé. Grâce à une analyse simultanée des changements d’azimuts absolus associée à un contrôle sur les valeurs de ceux-ci ainsi que sur la norme du champ magnétique, ces événements sont identifiables. Les critères de détection de perturbations devront être suffisamment sévères afin de ne pas permettre une mise à jour inopportune des paramètres du gyroscope. Simultanément, ils devront garantir un contrôle fréquent de ceux-ci et une adaptation si nécessaire. Le concept utilisé pour l’intégration optimale des deux azimuts est présenté sous 4.8.3.

L’usage exclusif du gyroscope en de telles périodes, bien que normalement très courtes (une à deux minutes maximum) nécessite un calibrage permanent de ce dernier. Le biais ainsi que le facteur d’échelle seront donc continûment mis à jour par l’intermédiaire des valeurs compassiques. La méthode ci-après fut développée à partir de capteurs physiquement disjoints dont la seule contrainte est d’être portés à des emplacements fixes l’un par rapport à l’autre. Les azimuts gyroscopiques se calquent sur leurs homonymes magnétiques, lesquels, dans une seconde phase, sont corrigés du défaut d’alignement grâce aux mesures satellitaires ou à une direction connue. L’avantage de cette approche est la possibilité d’un calibrage quasi continu des erreurs gyroscopiques. Ceci permet une utilisation du

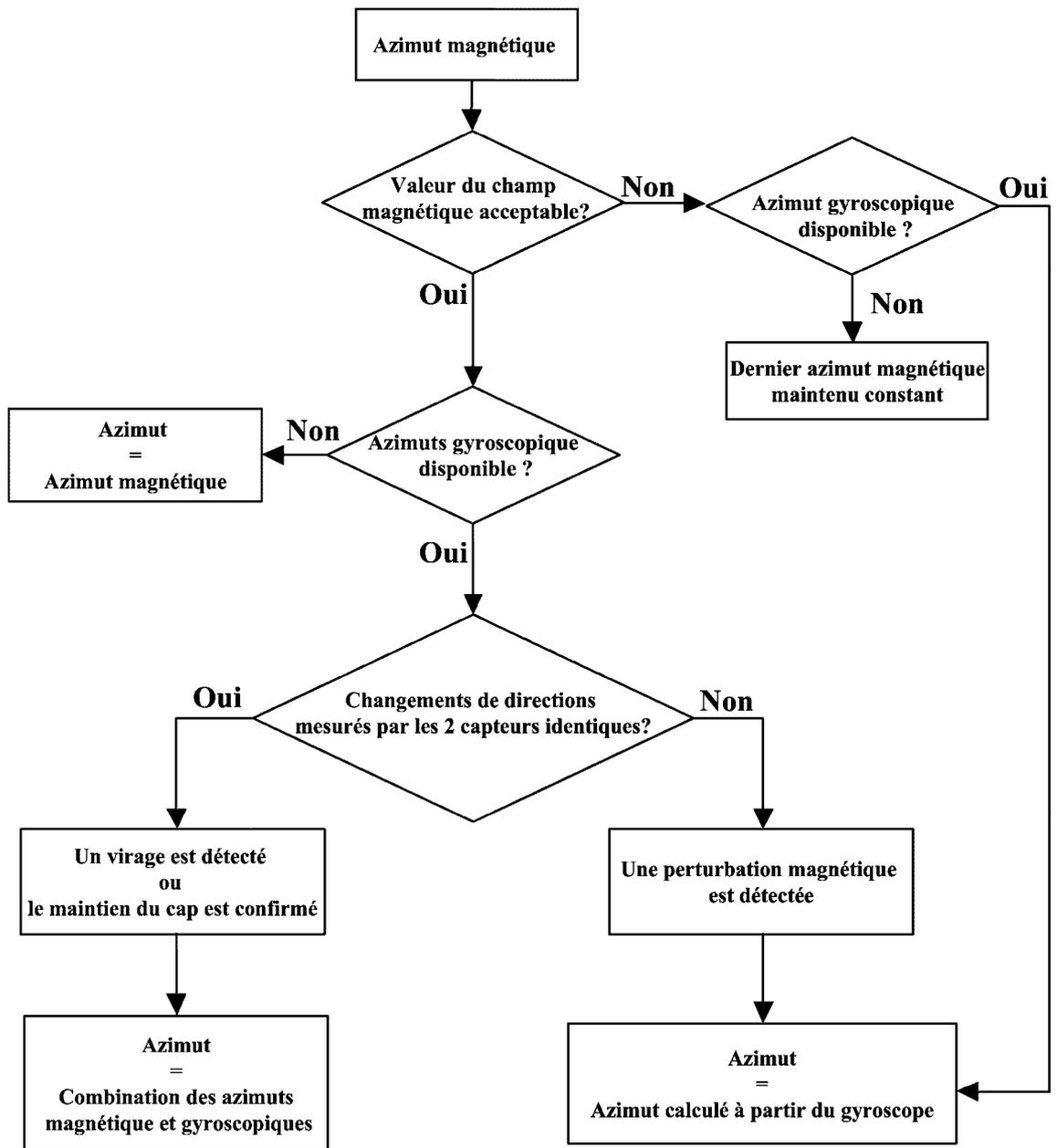


FIG. 4.18 – Procédure de traitement de l'azimut lorsqu'une perturbation magnétique est détectée. Selon les données disponibles, l'azimut magnétique est soit maintenu constant, soit remplacé par l'azimut gyroscopique, soit pondéré avec ce dernier.

gyroscope immédiate en cas de perturbation magnétique comme le montre les recherches décrites par Moix (2002). Du fait que l'approche ne requiert pas de senseurs alignés, l'usage d'un gyroscope dédié initialement à d'autres fins est envisageable selon les caractéristiques de celui-ci.

### Modélisation des données gyroscopiques

La modélisation d'une vitesse angulaire pour l'obtention d'un angle de déplacement est déterminée par l'équation (Eq. 3.14). Selon la disposition des senseurs, les valeurs calculées pour le facteur d'échelle  $\lambda$  sont proches de l'unité ( $1 \pm 0.01$  i.e.  $< 2^\circ$  pour un virage à 180 degrés). En mode dynamique et pour un virage rapide, ceci correspond à la limite de précision de l'azimut compassique. L'écart-type provoquant des imprécisions sur les angles calculés inférieures à la précision du compas magnétique déterminant l'azimut absolu, ce paramètre sera négligé par la suite. La détermination du biais requiert une importance majeure et influence directement la qualité des angles déduits du gyroscope. Une phase d'initialisation est nécessaire afin de caler le biais sur l'azimut du compas. Ceci peut se réaliser de manière statique ou en mouvement le long d'une trajectoire rectiligne, l'important étant que les vitesses angulaires peuvent être considérées comme nulles, la force de Coriolis étant ici négligée. Le modèle s'écrit alors

$$\tilde{\omega}_i = \omega_i - b_i + \varepsilon_i \quad (4.14)$$

où  $\tilde{\omega}_i$  est la vitesse angulaire vraie,  $b_i$  le biais instantané et  $\varepsilon_i$  une erreur aléatoire distribuée normalement.

En considérant l'azimut gyroscopique on peut écrire

$$\varphi_{début}^{gyro} - \varphi_{fin}^{gyro} = \sum_{i=1}^n (-b_i) \cdot \Delta t \quad (4.15)$$

où  $n$  est le nombre de pas de temps et  $\Delta t$  le pas de temps (ici 1/30 s). En faisant l'hypothèse d'un biais constant durant cette phase initiale, une valeur approchée du biais est donnée par

$$\bar{b} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (b_i) = \frac{\varphi_{début}^{gyro} - \varphi_{fin}^{gyro}}{\Delta T} \quad (4.16)$$

où  $\Delta T = n \cdot \Delta t$ . Cette valeur  $\bar{b}$  est ensuite mise à jour continuellement tant qu'aucune perturbation magnétique n'est détectée. La valeur du biais variant dans le temps, sa mise à jour requiert une estimation des erreurs présentes sur les deux azimuts.

### Mise à jour du biais non pondéré et propagation d'erreur

Partant de l'hypothèse que l'azimut du compas est considéré comme vrai, le biais sera mis à jour en ramenant l'azimut gyroscopique directement sur celui-ci. L'azimut du gyro-

scope, lors de la mise à jour, peut s'écrire

$$\varphi_{i+1}^{gyro} = \varphi_j^{compas} + \sum_{i=j}^{j+1} (\omega_i - b_j) \cdot \Delta t = \varphi_j^{gyro} + \sum_{i=j}^{j+1} (\omega_i - b_j) \cdot \Delta t \quad (4.17)$$

où  $j$  correspond aux époques de mise à jour du biais. Une telle modélisation considère que le biais est constant entre deux mises à jour, ce qui n'est pas toujours le cas dans la réalité.

L'azimut du compas peut également être décrit comme

$$\varphi_{i+1}^{compas} = \varphi_j^{compas} + \sum_{i=j}^{j+1} (\omega_i - b_i) \cdot \Delta t \text{ avec } b_i = b_j + \Delta b_i \quad (4.18)$$

$\Delta b_i$  étant l'incrément du biais par pas de temps  $i$ . En soustrayant (Eq. 4.18) de (Eq. 4.17) la correction moyenne du biais sur l'intervalle  $[j, j+1]$  devient

$$\overline{\Delta b}_{j+1} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=j}^{j+1} \Delta b_i = \frac{\varphi_{j+1}^{gyro} - \varphi_{j+1}^{compas}}{\Delta T} \text{ avec } \Delta T = n \cdot \Delta t = t_{j+1} - t_j \quad (4.19)$$

En mettant à jour simultanément le biais  $b_{j+1} = b_j + \overline{\Delta b}_{j+1}$  l'azimut gyroscopique corrigé est

$$\begin{aligned} \varphi_{j+1}^{gyro*} &= \varphi_j^{gyro*} + \sum_{i=j}^{j+1} (\omega_i - b_{j+1}) \cdot \Delta t \\ &= \varphi_{j+1}^{gyro} - \overline{\Delta b}_{j+1} \cdot \Delta T \end{aligned} \quad (4.20)$$

Une erreur sur le biais influence directement l'erreur sur l'azimut du gyroscope. L'évolution de cette valeur se calcule en appliquant la formule (Eq. 3.26) à l'équation (Eq. 4.19):

$$\sigma_b^2 = \sigma_{\Delta b}^2 = \frac{\sigma_{\varphi^{gyro}}^2 + \sigma_{\varphi^{compas}}^2}{\Delta T^2} \quad (4.21)$$

$\sigma_{\varphi^{gyro}}^2$  dépendant de la précision du biais, cela introduit une corrélation entre les valeurs. Dans le but de s'en affranchir, l'équation (Eq. 4.19) permet d'obtenir

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

et donc

$$b_{j+1} = \frac{\varphi_j^{compas} - \varphi_{j+1}^{compas}}{\Delta T} + \overline{\omega}_i \quad (4.22)$$

L'erreur moyenne sur le biais est donc

$$\sigma_b = \sqrt{\frac{2 \cdot \sigma_{\varphi_{compas}}^2}{\Delta T^2} + \frac{1}{n} \cdot \sigma_{\omega}^2} \quad (4.23)$$

L'équation (Eq. 4.23) fait l'hypothèse que les azimuts mesurés par le compas sont indépendants d'un pas à l'autre. Même si la suppression des mouvements de roulis spécifiques à la marche dans le calcul des azimuts des pas introduit des corrélations variables entre ceux-ci, ces dernières sont négligées. Dépendant du type de marche individuel, du rythme de déplacement ainsi que de l'activité proprement dite, ces valeurs sont impossibles à déterminer de façon fiable. Conceptuellement, la totale liberté de mouvement de la personne justifie également l'indépendance de deux directions de marche successives. L'erreur moyenne sur l'azimut gyroscopique évolue ainsi selon la relation suivante

$$\sigma_{\varphi_{j+m}^{gyro}} = \sqrt{\sigma_{\varphi_{compas}}^2 + m \cdot \Delta t^2 \cdot \sigma_{\omega}^2 + m^2 \cdot \Delta t^2 \cdot \sigma_b^2} \quad (4.24)$$

$m$  étant le nombre de pas de temps écoulé depuis la dernière mise à jour. L'erreur sur l'azimut gyroscope au temps de la mise à jour devient

$$\sigma_{\varphi_{mise \ à \ jour}^{gyro}} = \sqrt{\frac{2}{n} \cdot \Delta T^2 \cdot \sigma_{\omega}^2} \quad (4.25)$$

Cette valeur permet de prendre en compte l'erreur maximale souhaitable et définir ainsi l'intervalle de mise à jour maximal. L'hypothèse de la constance du biais peut induire quelque problème à ce stade. En effet, plus le temps entre deux mises à jour est long, plus la dérive du biais influence l'azimut. Celle-ci sera directement dépendante de la qualité des senseurs utilisés. Les essais réalisés ont donné des résultats satisfaisants jusqu'à un intervalle inférieur à 120 secondes.

L'azimut magnétique présentant une erreur, il ne peut être considéré comme vrai lors de la mise à jour du biais. Afin de pondérer cette valeur, deux approches ont été retenues: le filtre exponentiel tel que présenté sous le paragraphe 4.3.5 et le filtre de Kalman.

### Mise à jour du biais pondéré et propagation d'erreur

Ce modèle a l'avantage de prendre en compte l'évolution du biais tout en tenant compte des valeurs passées de manière plus ou moins importante. Ceci répond assez bien au comportement du biais observé en général et permet de diminuer l'effet d'un azimut compassique avec des perturbations magnétiques rémanentes. Le biais mis à jour s'écrit de la façon suivante

$$b_{j+1}^* = (1 - \alpha) \cdot b_{j+1} + \alpha \cdot b_j^* \quad (4.26)$$

L'équation (Eq. 4.20) devient alors

$$\varphi_{j+1}^{gyro*} = \varphi_j^{gyro*} + \sum_{i=j}^{j+1} (\omega_i - b_{j+1}^*) \cdot \Delta t \quad (4.27)$$

L'azimut gyroscopique est donc corrigé de la valeur suivante

$$\Delta\varphi_{j+1}^{gyro*} = \varphi_{j+1}^{gyro*} - \varphi_{j+1}^{gyro} = (1 - \alpha) \cdot \Delta T \cdot \overline{\Delta b}_{j+1} \quad (4.28)$$

En appliquant la loi de propagation d'erreur à l'équation (Eq. 4.26) devient

$$b_j^* = \alpha^j \cdot b_0 + \sum_{i=1}^{j+1} \alpha^{j-i} \cdot (1 - \alpha) \cdot b_i \quad (4.29)$$

Les hypothèses d'un pas de temps constant entre les mises à jour ainsi qu'un bruit nul sur la moyenne des vitesses angulaires mesurées conduisent à une erreur moyenne sur le biais égale à

$$\sigma_{b_j^*} = \sqrt{\frac{2 \cdot (1 - \alpha)^2}{\Delta T^2} \cdot \left( \sum_{i=0}^{j+1} (-\alpha)^i \right) \cdot \sigma_{\varphi_{compas}}^2 + \alpha^{2j} \cdot \sigma_{b_0}^2} \quad (4.30)$$

En considérant (Eq. 4.28), l'erreur moyenne sur l'azimut fourni par le gyroscope devient:

$$\begin{aligned} \sigma_{\varphi_{j+n}^{gyro*}}^2 &= \sigma_{b_0}^2 \left( \Delta T^2 \cdot \left( \sum_{i=1}^j (\alpha)^i \right)^2 + n^2 \cdot \Delta t^2 \cdot \alpha^j \right) + \\ &+ \sigma_{\varphi_{compas}}^2 \left( 2 \cdot \sum_{i=1}^{2j} (-\alpha)^i + 1 + \frac{2n^2 \cdot \Delta t^2 \cdot (1 - \alpha)^2}{\Delta T^2} \cdot \sum_{i=0}^{j+1} (-\alpha)^i \right) \end{aligned} \quad (4.31)$$

L'erreur moyenne sur l'azimut du gyroscope permet de pondérer celui-ci par rapport à l'azimut du compas, mais également de déterminer à partir de quel moment une re-initialisation du biais et de l'azimut est indispensable. La stabilité du gyroscope (partiellement caractérisée par  $\sigma_{b_0}^2$ ) joue un rôle prépondérant dans l'autonomie temporelle de celui-ci.

### Mise à jour du biais par filtrage de Kalman

Une approche couramment utilisée pour le couplage d'information de différentes précisions est le *filtrage de Kalman*. Elle est abondamment décrite dans la littérature (Gelb, 1971; Farrell et Barth, 1998); les équations finales sous leur forme discrétisée se présentent de la manière suivante.

Soit  $\mathbf{l} - \mathbf{v} = \mathbf{f}(\mathbf{x})$ ,  $\mathbf{l}$  étant les observations,  $\mathbf{v}$  l'erreur sur les mesures,  $\mathbf{x}$  les paramètres et  $f(x)$  les relations liant les mesures aux paramètres. Si les relations  $f(x)$  ne sont pas linéaires,

les fonctions sont préalablement linéarisées autour de la valeur  $\tilde{x}$  selon une décomposition en série de Taylor. On obtient:  $\mathbf{l} - f(\tilde{\mathbf{x}}) = \mathbf{H} \cdot dx$ . La relation  $\tilde{\mathbf{v}} = \mathbf{l} - f(\tilde{\mathbf{x}})$  représente les *observations réduites*.

Le filtre de Kalman s'écrit:

Initialisation	$\tilde{\mathbf{x}}$ $\mathbf{Q}_{\tilde{x}_1 \tilde{x}_1}$	=	paramètres prédits initiaux cofacteurs des paramètres prédits initiaux
Gain	$\mathbf{K}_k$	=	$\mathbf{Q}_{\tilde{\mathbf{x}}_k \tilde{\mathbf{x}}_k} \mathbf{H}_k^T [\mathbf{Q}_{\mathbf{l}_k \mathbf{l}_k} + \mathbf{H}_k \mathbf{Q}_{\tilde{\mathbf{x}}_k \tilde{\mathbf{x}}_k} \mathbf{H}_k^T]^{-1}$
Mise à jour	$\hat{\mathbf{x}}_k$ $\mathbf{Q}_{\hat{x}_k \hat{x}_k}$	=	$\tilde{\mathbf{x}}_k + \mathbf{K}_k [\tilde{\mathbf{v}}_k - \mathbf{H}_k \tilde{\mathbf{x}}_k]$ $[\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k] \mathbf{Q}_{\tilde{\mathbf{x}}_k \tilde{\mathbf{x}}_k} [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k]^T + \mathbf{K}_k \mathbf{Q}_{\mathbf{l}_k \mathbf{l}_k} \mathbf{K}_k^T$
Prédiction	$\tilde{\mathbf{x}}_{k+1}$ $\mathbf{Q}_{\tilde{x}_{k+1} \tilde{x}_{k+1}}$	=	$\phi_k \hat{\mathbf{x}}_k$ $\phi_k \mathbf{Q}_{\hat{x}_k \hat{x}_k} \phi_k^T + \mathbf{Q}_{ww_{k+1}}$

où  $Q_{xx}$  et  $Q_{ll}$  sont les matrices des cofacteurs des paramètres et des observations respectivement,  $\phi$  la matrice de transition,  $K$  la matrice de gain et  $Q_{ww}$  la matrice de bruit de prédiction entre l'époque  $k$  et  $k+1$ . Les paramètres considérés dans le présent modèle sont le biais et l'azimut.

Le biais est modélisé par un processus markovien de premier ordre

$$\dot{\tilde{b}} = -\alpha \cdot \tilde{b} + w \quad (4.32)$$

où  $\alpha^{-1}$  égale au temps de corrélation ( $1/e$ ) du biais et  $w$  est le bruit de prédiction associé. La linéarisation autour de la valeur prédite s'écrit

$$d\dot{\tilde{b}}_k = -\alpha \cdot d\tilde{b}_k \quad (4.33)$$

Le modèle de mouvement de l'azimut se définit par

$$\dot{\tilde{\varphi}}_k = \omega_k - \tilde{b}_k \quad (4.34)$$

ce qui permet d'écrire

$$d\dot{\tilde{\varphi}}_k = -d\tilde{b}_k \quad (4.35)$$

Il est à mettre en évidence ici que l'incrément  $k$  se réfère ici à une occurrence "pas" et non pas à un intervalle de temps. Le modèle de mouvement se présente donc comme

$$\begin{pmatrix} d\dot{\tilde{\varphi}}_k \\ d\dot{\tilde{b}}_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 0 & -\alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} d\varphi_k \\ d\tilde{b}_k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ a \end{pmatrix} \cdot w \quad (4.36)$$

Les valeurs de 0.05 pour  $a$  et de 0.05  $[(^{\circ})^2/s]$  pour la densité spectrale sur le bruit de prédiction du biais ont été déterminés empiriquement.

Le modèle d'observation ayant comme mesure les azimuts compassiques et comme valeurs prédites leurs homologues gyroscopiques se présente comme suit:

$$(\varphi^{compas} - \tilde{\varphi}^{gyro}) - v_{\varphi} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} d\varphi \\ db \end{pmatrix} \quad (4.37)$$

avec comme modèle stochastique  $R$  égale à  $\sigma_{\varphi^{compas}}^2$ .

La figure Fig. 4.19 présente deux méthodes d'intégration de l'azimut avec leur précision respective. La précision initiale de  $3^\circ$  prend en compte le fait que certaines perturbations résiduelles non détectées peuvent avoir lieu durant le calage de l'azimut gyroscopique. Cette valeur est empirique mais reflète la précision à laquelle on peut s'attendre pour une telle application. Les différences entre les deux approches sont très minimales et, dans la majorité des cas observés, inférieures à la précision de l'azimut magnétique. Les résultats pour un exemple particulier sont présentés à la figure Fig. 4.20. La distinction essentielle se situe dans la précision de l'azimut gyroscopique déterminé. Dans le cas du filtrage exponentiel, la précision s'appauvrit d'une mise à jour à l'autre, cumulant les imprécisions des précédents biais maintenues par un facteur  $\alpha$  constant. Le phénomène inverse s'observe dans le filtre de Kalman, car la matrice de gain a tendance à devenir de plus en plus petite et donc à faire confiance au modèle. L'erreur de prédiction devrait être artificiellement augmentée afin d'éviter toute convergence du gain vers zéro, ce qui aurait pour conséquence d'ignorer toute nouvelle mesure. Bien qu'elle ne converge pas, l'approche exponentielle reflète mieux la réalité que le modèle de Kalman.

Le champ magnétique pouvant présenter des perturbations indécélables, il est juste que l'imprécision de l'azimut gyroscopique augmente en fonction du temps, si les mises à jour sont effectuées par le compas uniquement. La présence continue de signaux satellitaires permettrait de justifier une augmentation de précision de chaque mise à jour, comme c'est le cas dans le filtrage de Kalman. Cette hypothèse, peu probable dans l'application considérée visant à se passer autant que possible de signaux extérieurs, ne peut être retenue. La difficulté de définir et surtout de justifier des valeurs universelles autrement que de manière expérimentale penche également pour un modèle simple et fiable. La similitude des résultats parle donc en faveur de l'utilisation du filtrage exponentiel, surtout lors d'applications en temps réel.

Une fois toutes les mesures intégrées pour la détermination du déplacement, l'azimut de marche est calculé en tenant compte des différents mouvements possibles décrits au paragraphe 4.3.1. La figure Fig. 4.21 décrit la succession des tests effectués. Il ressort également des essais entrepris que le gyroscope fournit des changements d'azimuts plus précis que le compas lors de virages brusques. Ceci s'explique partiellement par l'influence directionnelle des perturbations magnétiques sur l'azimut. Les résultats obtenus, cf tableau Tab. 4.5, présentent les écarts absolus observés entre des changements d'orientations connus de  $45^\circ$  à  $180^\circ$ . En accord avec la précision du senseur gyroscopique, les écarts, montrent que l'omission du facteur d'échelle ne saurait à lui seul expliquer ces différences.

### 4.8.3 Considérations pour la mise à jour des paramètres du gyroscope

La mise à jour de paramètres sous-entend toujours la présence d'information reflétant mieux la réalité que le modèle utilisé. A long terme, ceci est le cas pour les données provenant du compas magnétique. Sachant qu'une mauvaise mise à jour du biais du gyroscope

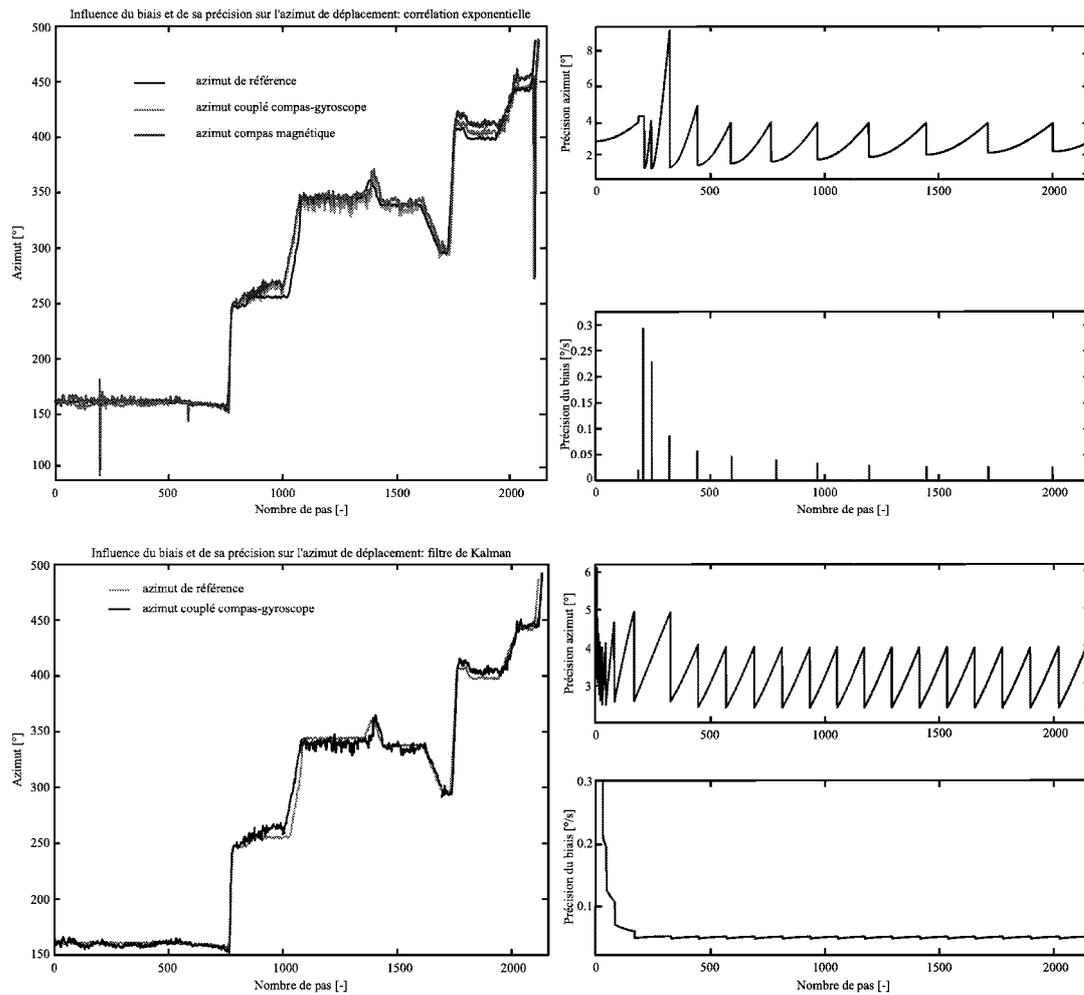


FIG. 4.19 – Mise à jour du biais selon deux approches différentes et leur conséquence sur la précision de l'azimut gyroscopique. Dans le cas du filtre de Kalman, les fréquentes mises à jour du début sont causées par l'hypothèse d'un biais inconnu (précision de  $100^\circ$ ). Le seuil de mise à jour a été placé à  $4^\circ$ .

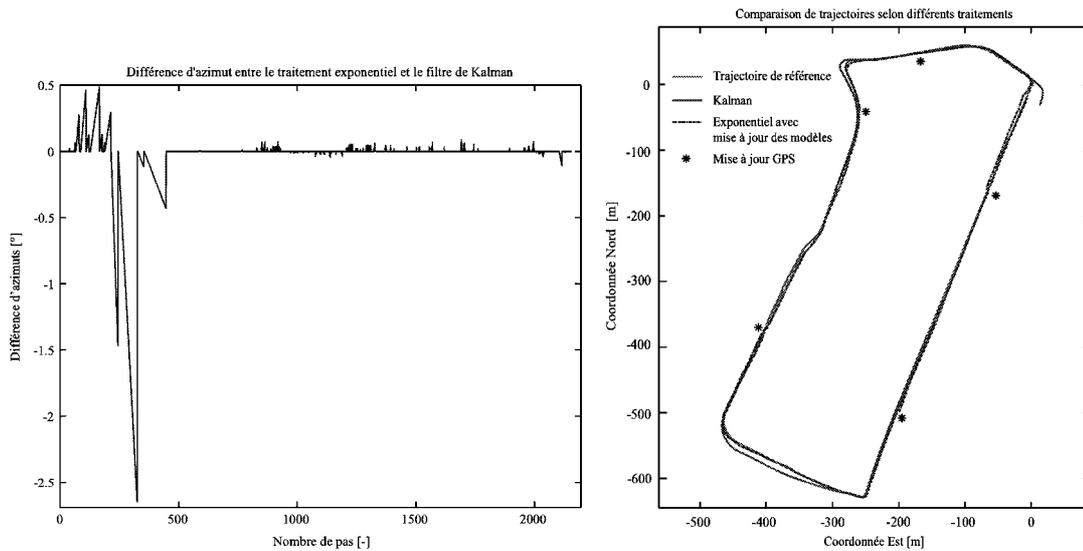


FIG. 4.20 – Différences dans le calcul des azimuts selon la mise à jour du biais gyroscopique. Comme elles sont en règle générale inférieures à la précision de l'azimut magnétique, les deux méthodes sont considérées comme équivalentes. Les écarts entre les trajectoires dues à la présence ou non d'une mise à jour GPS demeurent faibles et inférieures aux 5% de la distance parcourue (dans le cas présent 0.9%). On notera que la trajectoire calculée intégrant toutes les mesures de navigation à l'estime et les solutions GPS de navigation, se superpose quasiment à la trajectoire vraie (GPS différentiel L1/L2 phase). Cet aspect justifie également, depuis la suppression de la disponibilité sélective, l'utilisation d'un seul récepteur GPS sans corrections différentielles pour la navigation pédestre.

Virage [°]	Début-Fin: 1 pas [°compas/°gyro]	Début-Fin: moy. 10 pas [°compas/°gyro]
45	1.85 / 1.42	1.51 / 1.46
45	6.81 / 1.23	2.34 / 1.31
90	-2.89 / 0.87	-1.27 / 0.78
90	-8.27 / -1.01	4.16 / 1.12
90	-5.88 / 0.74	-4.37 / 0.81
90	0.87 / 0.09	0.76 / 0.51
180	3.14 / 1.41	2.19 / 1.31
180	0.09 / -1.11	0.54 / 0.97
180	-5.42 / 0.56	-3.21 / 0.76
180	2.25 / -0.94	1.97 / -1.12
180	3.55 / 1.58	3.49 / 1.27

TAB. 4.5 – Écarts entre virages vrais et virages mesurés par le compas magnétique et le gyroscope. Les résultats montrent que le gyroscope est plus à même de définir, de manière fiable la valeur absolue des virages. En moyennant les 10 derniers pas avant et après le virage on constate une amélioration importante pour les valeurs compassiques. Ceci est dû vraisemblablement aux perturbations magnétiques résiduelles ayant une influence plus visible lors d'un changement d'azimut important. Les valeurs gyroscopiques légèrement supérieures lors de la moyenne peuvent provenir du filtrage passe-bas du signal n'ayant pas la même influence compensatoire que sur le champ magnétique. A aussi court terme, l'évolution du biais n'explique pas a priori cette différence. On notera cependant que les différences obtenues sont inférieures aux 3° de précision dynamique mentionnée par le constructeur et tout à fait en accord avec la résolution du senseur.

peut avoir des conséquences pires qu'une non modélisation de celui-ci, une importance cruciale est donnée à la validation de l'azimut magnétique. Cette étape se base principalement

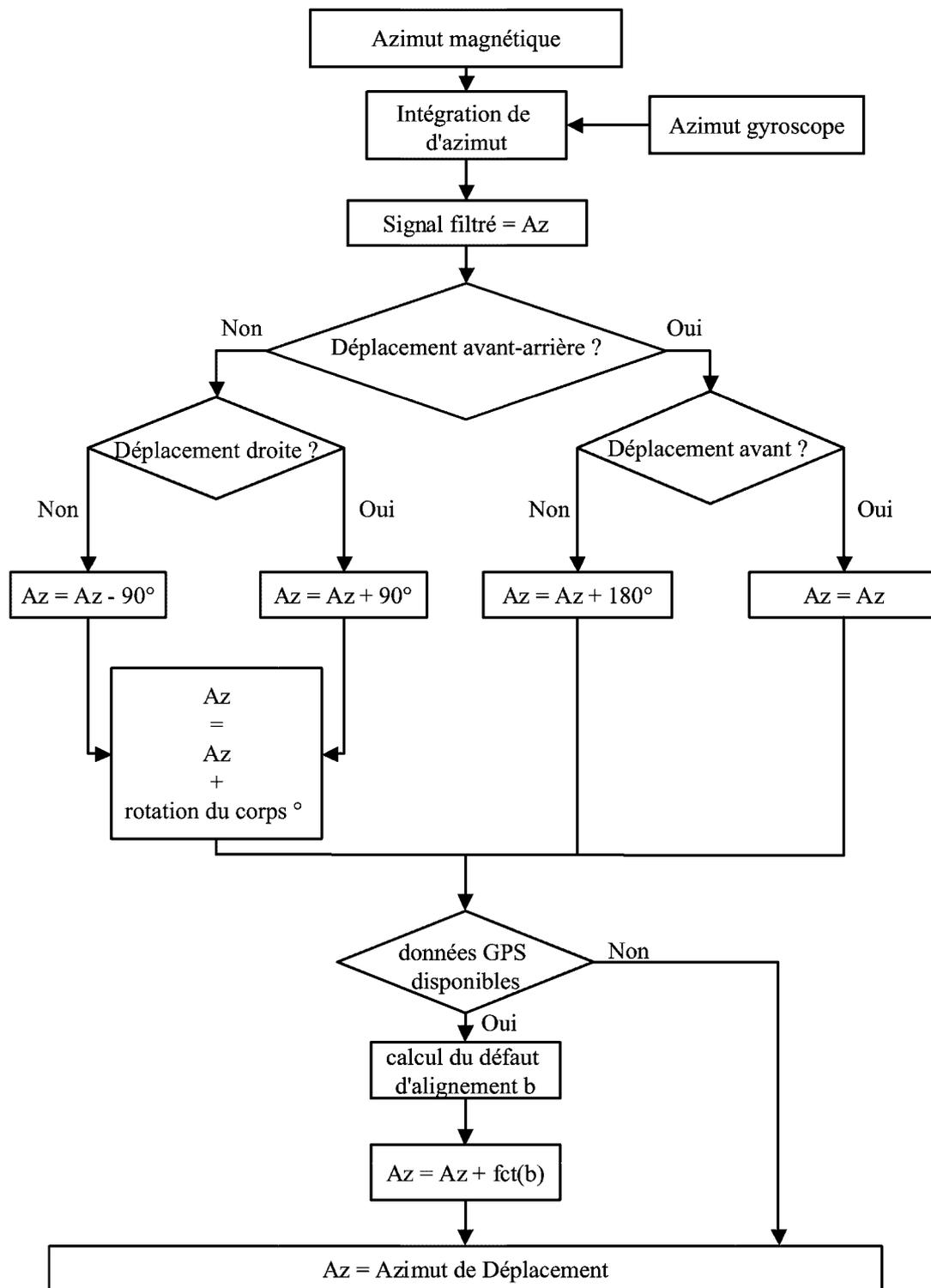


FIG. 4.21 – Flux de données présentant les différentes étapes nécessaires afin de définir l'azimut de déplacement à partir de l'azimut calculé. Selon le type de mouvement effectué, une valeur correspondante sera ajoutée à l'azimut afin de refléter celui-ci en coordonnées. Lors de mouvements latéraux, un biais supplémentaire dû à la rotation du bassin est ajouté. Cette valeur peut varier entre  $\pm 1^\circ$  et  $\pm 3^\circ$  selon les personnes rencontrées. Si les signaux satellitaires sont disponibles, une mise à jour du défaut d'alignement sera également effectuée.

sur les considérations suivantes.

- Un changement de direction significatif est détecté de manière univoque sur une distance correspondant à 5 pas. Toute variation vraie doit se refléter simultanément sur le signal du compas et du gyroscope. Toute singularité du compas identifie une perturbation magnétique.
- Suite à une perturbation magnétique, une zone de sécurité doit être considérée avant toute mise à jour. Le but est d'éviter les perturbations d'amplitudes sensiblement inférieures au seuil de détection.
- Lors de tout changement de direction majeur ( $> 60^\circ$ ), le défaut d'horizontalité potentiel du compas joint aux perturbations magnétiques locales peuvent induire une variation d'azimut magnifiée ou fortement minimisée. Ces zones spécifiques bénéficient donc d'une pondération des azimuts favorisant fortement les données gyroscopiques.
- Comme les azimuts sont filtrés de manière variable en fonction du rythme de marche et des entités *pas*, la notion de temps liée à la mise à jour du biais est sous-jacente et non directement utilisée. La conséquence est que deux pas successifs peuvent être très distants dans le temps, notamment durant une période de repos, et de fait nécessiter deux mises à jour successives. La dérive du gyroscope doit donc être prise en compte même si aucun azimut de déplacement n'est calculé.

En combinant sous forme de tests et de conditions les différentes observations ci-dessus, l'optimisation de la mise à jour des paramètres du gyroscope sera fonction d'une part de la dépendance spatiale des azimuts magnétiques, d'autre part celle temporelle liée au gyroscope. Deux situations caractéristiques de navigation en milieux magnétiquement "neutre" Fig. 4.22 et fortement perturbé Fig. 4.23 illustrent le résultat de ces différents concepts.

### Intégration gyroscope-senseurs magnétiques

En supposant que l'on dispose d'un gyroscope et de senseurs magnétiques installés rigidement et de façon constante l'un par rapport à l'autre, il est théoriquement possible de calculer l'attitude du système sans avoir recours aux accéléromètres. Ceci découle du fait que le champ magnétique est insensible aux accélérations. Des valeurs mesurées il est possible d'écrire

$$\mathbf{d}_i = \boldsymbol{\omega}_i \wedge \mathbf{b}_i \tag{4.38}$$

où  $\mathbf{d}$  est la différence temporelle du champ magnétique  $\mathbf{b}$  entre deux époques et  $\boldsymbol{\omega}$  le vecteur des rotations du système. Si les deux systèmes sont calibrés, nous obtenons pour l'utilisation d'un gyroscope à axe vertical  $z$ :

$$z \wedge \mathbf{d}_i = (z \cdot \mathbf{b}_i) \cdot \boldsymbol{\omega}_i - s_i \cdot \mathbf{b}_i \tag{4.39}$$

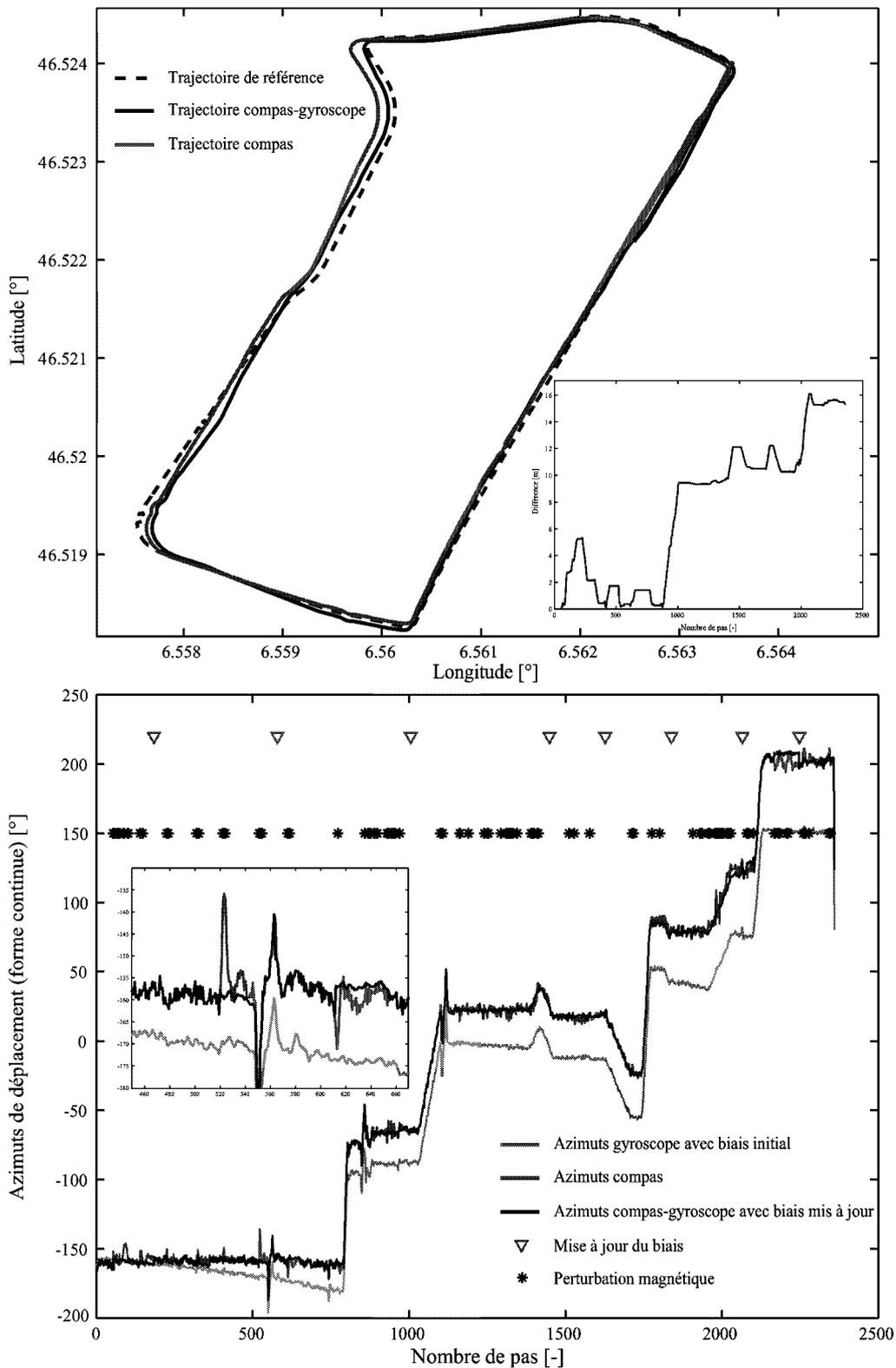


FIG. 4.22 – Parcours en zone péri-urbaine pouvant être considéré comme magnétiquement neutre. De nombreuses perturbations locales n'affectant que un ou deux pas successifs sont détectées et leur influence supprimée par l'utilisation du gyroscope. Le biais et l'azimut du gyroscope sont mis à jour de manière régulière aux endroits jugés optimaux. Sans aucune mise à jour de position absolues par GPS, les diverses trajectoires cumulent progressivement des différences mais ne s'écartent pas sensiblement de la trajectoire vraie.

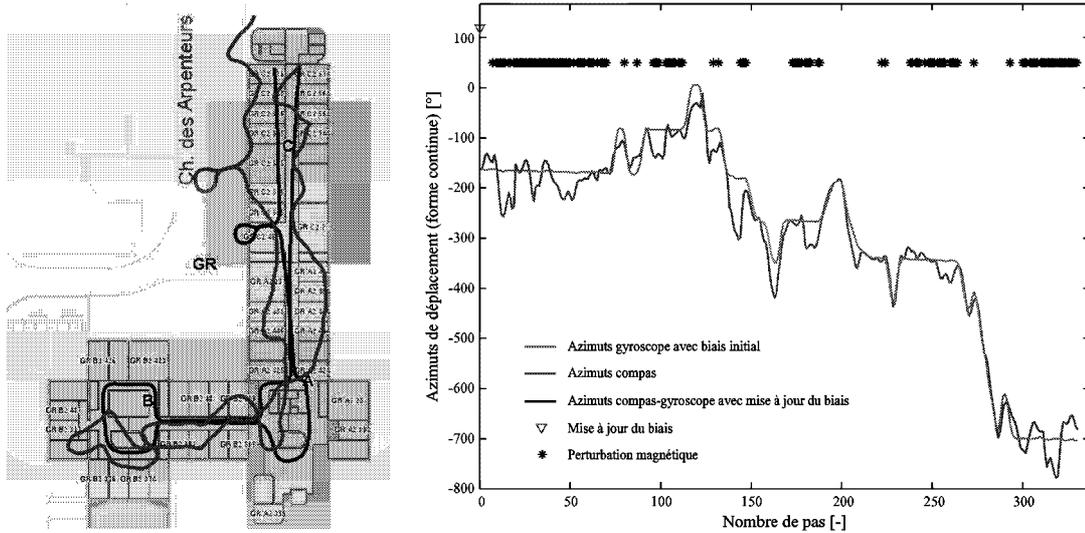


FIG. 4.23 – Trajectoire à l'intérieur d'un bâtiment avec piliers en acier apparents. Les différents critères et contrôles effectués ne permettent pas de considérer un azimut magnétique comme fiable. La conséquence visible est une divergence progressive de l'azimut gyroscopique principalement visible le long du couloir central. Sans possibilité d'actualisation, la qualité de la trajectoire est directement dépendante du type de gyroscope utilisé.

dans laquelle  $s$  est la vitesse angulaire mesurée par le gyroscope. En résolvant par rapport à  $\omega$ , l'équation (Eq. 4.39) devient, sous forme matricielle:

$$\begin{pmatrix} \check{\omega}_x \\ \check{\omega}_y \\ \check{\omega}_z \end{pmatrix}_i = \left[ \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{pmatrix}_i + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_z \end{pmatrix}_i \cdot \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix}_i \right] \cdot \frac{1}{b_z} = \begin{pmatrix} \frac{b_{y_{i-1}} - b_{y_i}}{\Delta t} \cdot \frac{1}{b_{z_i}} \\ \frac{b_{x_{i-1}} - b_{x_i}}{\Delta t} \cdot \frac{1}{b_{z_i}} \\ s_{z_i} \end{pmatrix} \quad (4.40)$$

L'équation (Eq. 4.40) permet donc de définir le vecteur de rotation total du système. On remarque cependant dans l'équation (Eq. 4.38) que le système est singulier lorsque l'axe du gyroscope se trouve perpendiculaire au champ magnétique. Ceci s'explique par le fait que le gyroscope fournit la rotation complémentaire du champ magnétique. En se trouvant perpendiculaire à cette dernière, il n'est plus à même de fournir cette information et le système devient donc singulier. De par la disposition des capteurs dans l'application considérée, du bruit présent ainsi que de la latitude à laquelle les tests sont effectués, une telle singularité est peu probable.

## 4.9 La troisième dimension: l'altitude

La connaissance en continu de l'altitude ouvre la porte non seulement à une localisation tri-dimensionnelle, mais également à des analyses physiologiques et énergétiques. Les termes de l'équation (Eq. 2.1) étant désormais modélisables, des relations entre vitesse de marche, déplacement et consommation énergétique peuvent être établies (Epstein et al., 1987; Eston et al., 1998; Melanson et al., 1995; Pivarnik et Sherman, 1989). La trajectoire planimétrique est également améliorée par la prise en compte du cosinus de la pente lors de la projection

des différents tronçons.

Dans la navigation pédestre, trois facteurs principaux provoquent des changements d'altitude, chacun avec des particularités permettant leur identification:

1. **les pentes:** douces ou fortes, les changements sont généralement continus et réguliers.
2. **les escaliers:** présentent un gradient altimétrique de  $\pm 1$  m pour 5 pas équivalant à autant de marches.
3. **les ascenseurs:** aucun mouvement n'est perçu sur les signaux accélérométriques, mais l'ascension est détectée par le baromètre.

Comme pour la position planimétrique, l'information relative est significativement plus précise que l'absolue. Un calage occasionnel par GPS ou sur un point connu aura donc lieu pour éviter toute divergence et influence météorologique.

La résolution du baromètre utilisé implique, pour plus de fidélité au parcours réellement effectué, un traitement de la pression mesurée. 0.1 mb représentant environ 1 m de dénivellation, les oscillations entre deux hauteurs successives sont fréquentes, même en terrain plat. Le filtrage temporel réalisé prend donc en considération la plausibilité du mouvement par rapport au type de situation défini sous 4.9. Un filtre exponentiel est ensuite appliqué avant le calcul de l'altitude dans le cas des pentes et de l'ascenseur. Ceci permet de simuler des changements de pression continus. Dans le cas particulier des escaliers, leur hauteur étant en règle générale normalisée (16.25 cm à 19.6 cm pour la Suisse), une dénivellation progressive est prise en compte dès que l'événement est détecté. L'illustration Fig. 4.24 présente une descente d'escalier typique à l'intérieur d'un immeuble, alors que Fig. 4.25 décrit un changement d'altitude progressif réalisé durant un parcours en plein air.

### 4.10 Concept de fiabilité dans la navigation pédestre

Le concept de fiabilité servant à prédire la défaillance d'un fonctionnement dans des processus industriels peut s'appliquer, après quelques adaptations, au domaine de la navigation pédestre. L'intégration de différentes mesures provenant de capteurs indépendants permet, de par les redondances de l'information, la détection d'un mauvais calibrage, de fautes et d'erreurs systématiques dans les modèles.

La notion de fiabilité en géomatique fut introduite par Baarda (1968) pour le calcul de réseaux géodésiques. Si les mesures et modèles sont passablement différents, l'approche, elle, est transposable à nombreuses applications. Le module développé permet les redondances des mesures suivantes: 3 azimuts (compas-gyroscope-GPS), 2 altitudes (baromètre-GPS) et 2 distances parcourues (navigation à l'estime - GPS). Les positions résultant du calcul de points lancés et n'étant pas directement mesurées, la redondance navigation à l'estime - GPS ne sera pas prise en compte.

Les indicateurs doivent tenir compte également de la dégradation de précision inéluctable (temporelle et/ou locale) liée aux technologies utilisées. Précision et fiabilité étant théoriquement des notions bien distinctes, l'évolution de la première ne devrait point influencer le deuxième indicateur. Ceci est vrai pour des modèles bien définis, généralement fixes et constants soit dans le temps, soit dans les résultats qu'ils doivent produire. Par rapport à la problématique de la marche où tout est en continuelle évolution, une telle affirmation paraît moins catégorique. Les situations rencontrées dans le cadre de cette recherche montrent que la précision d'un azimut compassique en milieu perturbé est telle

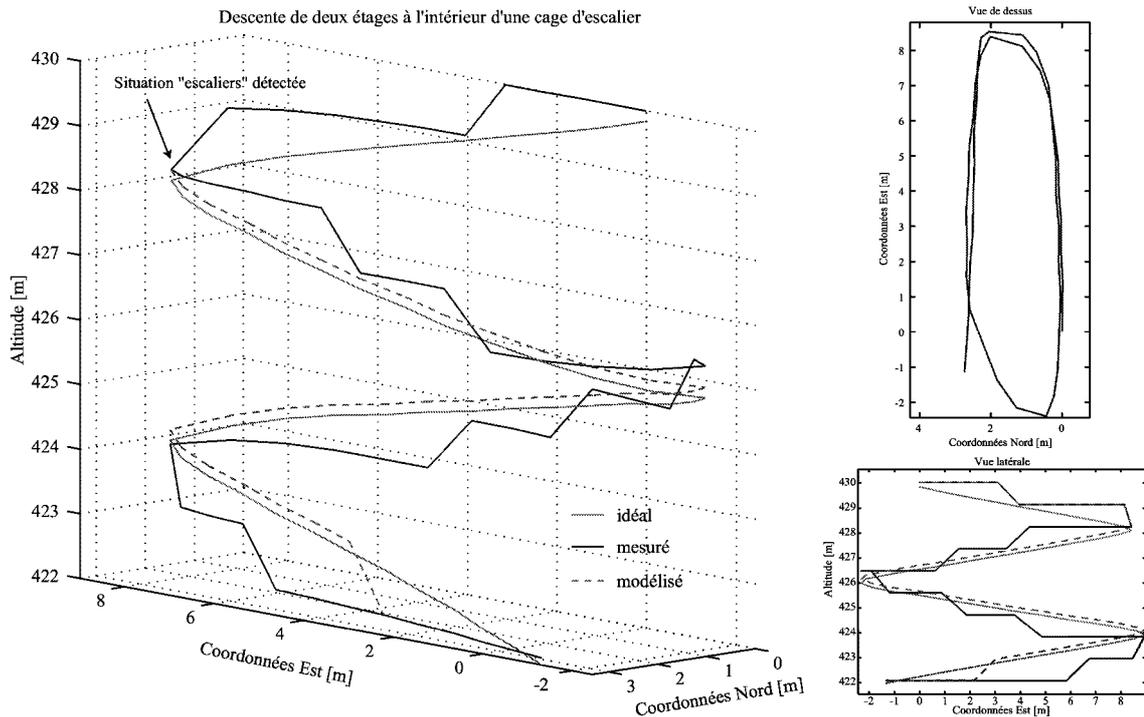


FIG. 4.24 – Représentation 3D d'une descente d'escaliers à l'intérieur d'un bâtiment. La dénivellation de 7.80 m est modélisée ici, après filtrage et traitement de la pression, à 7.28 m. L'amélioration par rapport à la résolution des senseurs est permis grâce à une détection de la situation ainsi qu'à une analyse appropriée.

que sa fiabilité peut être remise en question. Une conclusion similaire est vraie pour l'utilisation d'un gyroscope à long terme (quelques secondes ou minutes selon le type de senseur considéré).

Deux indicateurs seront construits afin de refléter la qualité des mesures et des valeurs qui en découlent.

- Le premier paramètre traduit la part de redondance du système. Ceci représente le degré de certitude d'une observation contre la présence d'une faute. Cette notion s'appelle la **fiabilité interne** du système. Dans le cas de l'azimut de marche, compas et gyroscope fournissent des orientations se contrôlant réciproquement. Les valeurs empiriques suivantes retenues pour ce paramètre sont présentée dans le tableau Tab. 4.6. Les pourcentages mentionnés tiennent compte des traitements effectués. Par exemple, même si l'azimut gyroscopique dérive de manière trop importante, l'information sur les vitesses de rotation permet de valider l'azimut du compas magnétique de par la non-détection de perturbations magnétiques (on part de l'hypothèse que le défaut d'alignement du capteur par rapport à l'axe de la marche est connu). Un raisonnement similaire est appliqué pour les autres mesures.
- Le second indicateur se rapproche davantage des utilisations géodésiques. Il représente l'effet sur les coordonnées de la plus grande faute non détectable pouvant affecter chacune des observations. On parle alors de **fiabilité externe**. Dans l'application considérée, seul l'indicateur relatif à l'azimut de déplacement a un sens bien défini. Les perturbations magnétiques étant détectées par l'utilisation d'un seuil empirique, toute agitation inférieure à cette valeur produira une erreur. Cette dernière se répar-

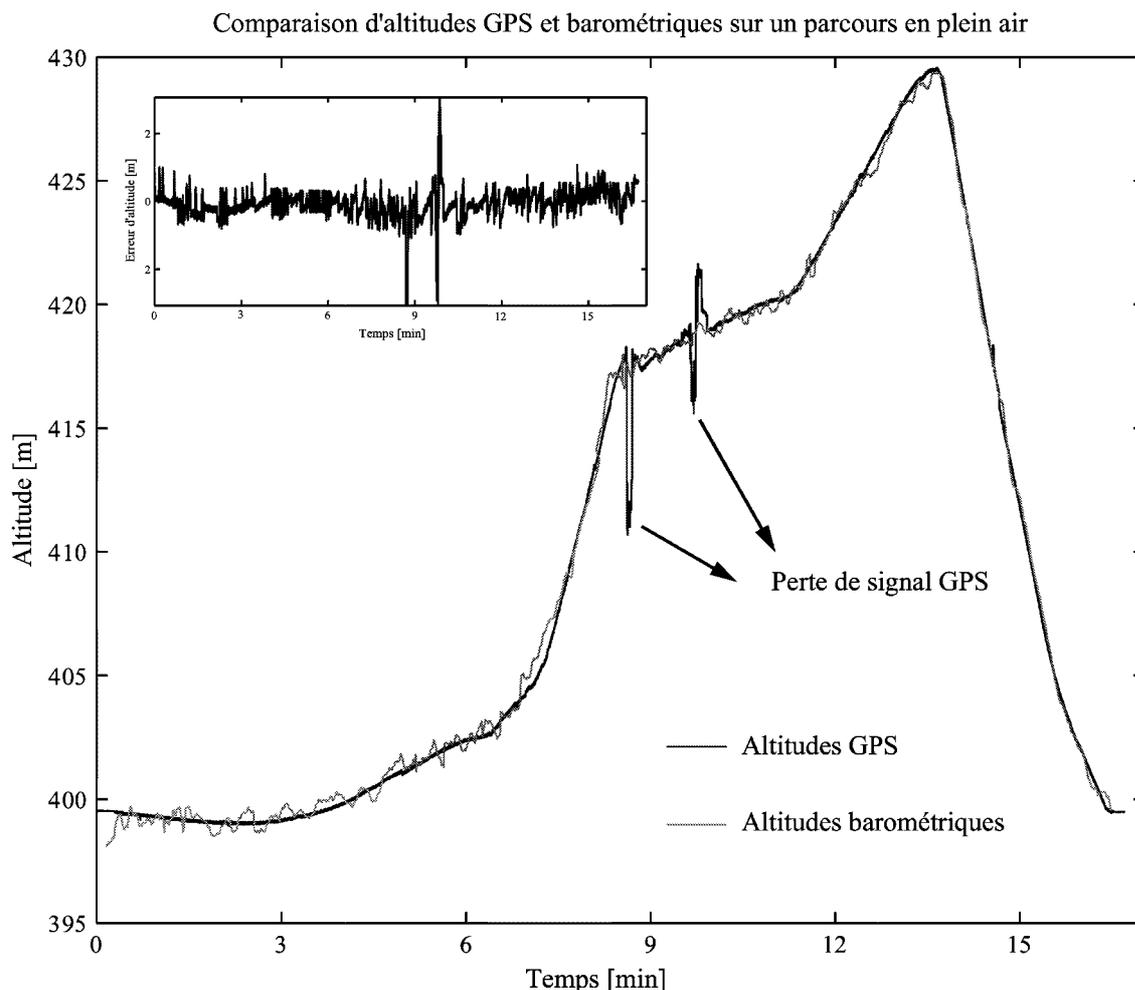


FIG. 4.25 – Comparaison d'altitude GPS et barométriques sur un parcours en plein air. Celui-ci est réalisé sans mise à jour aucune des altitudes barométriques ce qui montre la cohérence ainsi que l'absence de dérive à court terme de cette solution. La différence moyenne des altitudes est de 0.71 m avec un maximum à 2.1 m ne prenant pas en compte le tronçon incluant la perte et la ré-acquisition du signal satellitaire. Dans plus de 70% du temps, les différences obtenues sont inférieures à la résolution ( $\pm 1\text{m}$ ) du baromètre utilisé.

tira ensuite sur les composantes Nord-Est en fonction de l'azimut de déplacement comme illustré à la figure Fig. 4.26. Une imprécision sur la modélisation du biais du gyroscope causera également un cumul d'erreur difficilement identifiable à court terme.

Il est important de mentionner qu'en navigation à l'estime, une seule zone perturbée non détectée peut avoir des conséquences importantes sur l'erreur de parcours. Sans re-positionnement absolu, l'erreur aura tendance à rester constante. La trajectoire mesurée après la perturbation est parallèle à la vraie à une distance proportionnelle au nombre de pas effectués durant la période de perturbation.

L'emploi des signaux satellitaires permet également de limiter l'influence d'une erreur non détectée. L'intervalle temporel entre deux positions GPS influence donc la fiabilité externe du système.

Ces deux indicateurs n'apparaissent pas explicitement à l'intérieur des algorithmes mais

Valeur	Situation de calcul de l'azimut
0%	Perturbations magnétiques/longues périodes sans re-calibrage du gyroscope
25%	Perturbations magnétiques/re-calibrage récent du gyroscope
50%	Zone magnétiquement stable/longues périodes sans re-calibrage du gyroscope
75%	Zone magnétiquement stable/re-calibrage récent du gyroscope
+25%	à chaque cas si l'azimut GPS a pu être calculé

TAB. 4.6 – Pondération empirique des différents scénarios permettant le calcul de l'azimut de déplacement. Les pourcentages mentionnés tiennent compte des différents traitements effectués. La présence des signaux satellitaires augmente également la fiabilité de l'azimut pour autant que la distance considérée entre deux positions soit en rapport avec le mode de calcul choisi (Solution de Navigation ou DGPS)

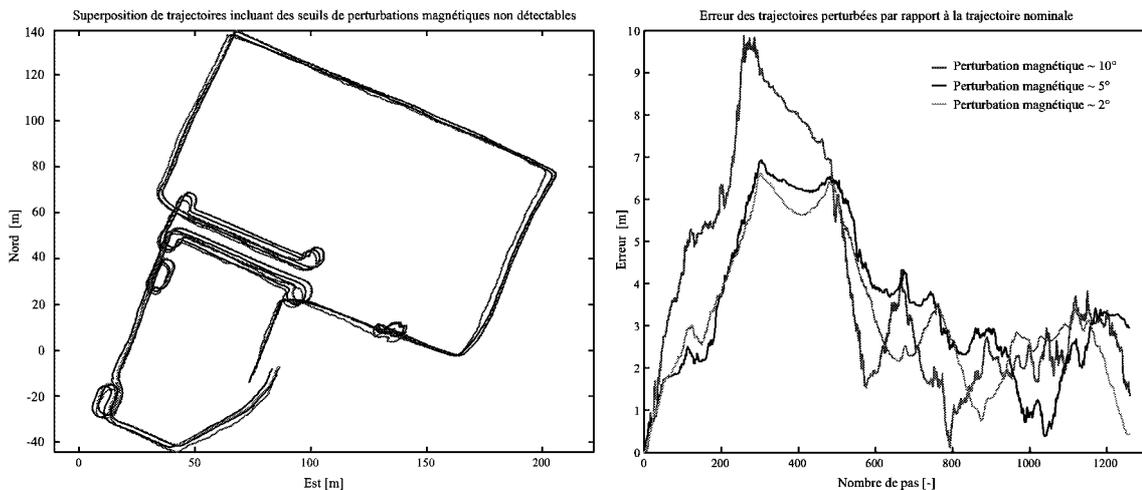


FIG. 4.26 – Représentation de la notion de fiabilité interne pour l'azimut de déplacement. Un seuil étant fixé empiriquement pour la détermination d'une perturbation magnétique, les perturbations inférieures à cette valeur ne sont pas détectées et provoquent des erreurs de position. Les perturbations induisant des variations de  $2^\circ$  à  $10^\circ$  ont été simulées. Des valeurs supérieures sont repérées dans la plupart des cas. On remarquera qu'empiriquement la plus grande erreur possible reste inférieure à l'erreur considérée sur la solution GPS de navigation.

leur objectif est réalisé à l'aide de nombreux tests de plausibilité. Un indicateur est cependant fourni en se basant sur un cumul des valeurs selon une logique conditionnelle. Sa valeur n'a pas de signification mathématique précise, mais il permet de se rendre compte intuitivement de la qualité de l'information reçue. Comme il est courant en géodésie, la planimétrie ainsi que l'altimétrie auront chacune un indicateur propre. L'exemple suivant Tab. 4.7 considère la solution fournie par le module dans la majeure partie des cas de navigation à l'estime.

## 4.11 Analyse globale des résultats

De manière globale, les résultats des tests opérés dans des circonstances variées montrent que l'approche événementielle est judicieuse. Sans calibrage et en tenant compte uniquement des paramètres physiologiques de la personne, le trajet parcouru est approximé avec un facteur d'échelle de  $\pm 5\%$ . Suite à un calibrage initial, les erreurs sur la distance parcouru-

Indicateur Fiabilité	Valeur	Situation de calcul de la position
<b>Altimétrie: 50%</b>	0%	Aucun satellite visible Altitude mesurée par baromètre, calée au préalable sur un point connu
	50%	Modèle de pas calibré Azimut compas valide mais aucun re-calibrage récent du gyroscope
<b>Planimétrie: 50%</b>	50%	

Tab. 4.7 – Exemple caractéristique de fiabilité fournie par le module lors de navigation à l'estime. La notion de temps entrera pour l'altimétrie. Dès que trop de temps se sera écoulé sans calage, les variations atmosphériques possibles ne permettront plus d'avoir une altitude absolue fiable et donc la valeur tombera à 0%.

re uniquement sont réduites à  $\pm 3\%$  du parcours total. Des différences répétées inférieures à  $\pm 1\%$  pour des modèles parfaitement calibrés justifient l'hypothèse d'une variation de la taille des pas autour d'une valeur constante. La mise à jour continue par mesures GPS des paramètres de marche permet l'adaptation du modèle à toute modification du style de déplacement d'une personne. En basant le calcul de la taille des pas normalisée sur la durée de ceux-ci, le modèle répercute automatiquement toute situation de fatigue ou de difficulté sur la dimension des enjambées.

La reconnaissance de certains motifs accélérométriques permet d'affiner la trajectoire mesurée, pour autant que le module de mesure soit placé aux endroits prédéfinis. La position optimale étant centrée dans le dos au niveau de la taille, la projection des accélérations dans un référentiel similaire permet d'obtenir des résultats semblables en cas de décentrement du capteur. De la stabilité de l'attache dépendra cependant fortement la fiabilité de la détection.

Cette fixité joue également un rôle majeur dans la détermination du plan horizontal pour la projection du vecteur magnétique terrestre. L'importance des termes correctifs en cas d'instabilité rend indispensable une phase de calibrage afin de déterminer ceux-ci et connaître leur influence en fonction de l'azimut de marche.

On remarque que malgré une oscillation des azimuts due aux rotations du bassin, un filtrage approprié permet l'obtention de la direction de déplacement à  $\pm 1^\circ$  près. En milieu magnétiquement non perturbés, cette précision est obtenue par la seule utilisation du compas magnétique. Différents tests sur la norme du champ mesuré ont permis de fixer des seuils à partir desquels l'azimut calculé est considéré comme perturbé. Le maintien du dernier cap constant jusqu'à une zone à nouveau neutre présente une solution acceptable sur quelques pas mais est trop limitative à long terme. L'utilisation du gyroscope permet une autonomie évidente vis à vis de l'environnement. Les essais réalisés montrent qu'un usage continu de une à deux minutes est suffisant dans la grande majorité des situations vécues, à l'intérieur comme en plein air. L'approche retenue d'un système compas-gyroscope décentralisé prouve que l'alignement physique des deux senseurs l'un par rapport à l'autre n'est pas indispensable. L'orientation relative initiale du gyroscope sur les données compassiques permet très rapidement une navigation robuste si le compas est aligné dans la direction de marche. En cas de divergence avec le compas, les positions fournies par GPS sont à utiliser le plus rapidement possible pour la détermination du biais. Si le système est monté sur un harnais ou à un emplacement fixe, la valeur sera gardée en mémoire. Cet aspect est particulièrement important lors d'une utilisation en zone urbaine où les positions satellitaires permettant un calibrage sont rares. En addition à une très mauvaise visibilité du ciel, le multi-trajet présente un facteur limitant important pour l'usage du GPS.

Antenne	min	moyenne	max
Patch	0	2	6
Hélicoïdale	0	3	8
Linéaire	0	5	9

TAB. 4.8 – Nombre de satellites utilisés par le récepteur GPS pour calculer une position 3D durant des tests en ville de Lausanne. Les antennes de type Patch, généralement conçues pour les voitures sont nettement moins sensibles que leurs homologues spécialement développées pour la navigation pédestre.

Si le réglage du récepteur GPS doit être réalisé pour prendre en considération la dynamique de la navigation pédestre, le choix du récepteur proprement dit ainsi que de l'antenne vont également jouer un rôle déterminant sur la possibilité de calculer une position satellitaire. Les essais réalisés par MacGougan et al. (2002) montrent qu'avec un récepteur à haute sensibilité, il est possible d'augmenter significativement le nombre de satellites observés dans des canyons urbains et de tirer parti du signal GPS même à l'intérieur d'un bâtiment. Bien que la précision obtenue pour ce dernier (de l'ordre de 50 m) ne soit pas encore satisfaisante pour le guidage de personnes, ce type de récepteur ouvre de nouveaux horizons pour la navigation à l'intérieur d'édifices.

La plupart des antennes *patch* disponibles sur le marché sont dénuées d'amplificateurs. Elles sont initialement construites pour des applications routières où la structure métallique du véhicule est supposée remplir cette fonction. Comme cette structure n'est pas présente sur une personne, la performance de l'antenne se retrouve fortement réduite. A ceci vient s'ajouter le fait que, le piéton se déplaçant le long de trottoirs, plus de 50% du ciel est généralement obstrué par des bâtiments. L'utilisation d'antennes spécialement conçues pour la navigation pédestre est donc indispensable en zone urbaine. Le tableau Tab. 4.8 présente le nombre de satellites visibles simultanément par 3 antennes différentes durant les tests illustrés par la figure Fig. 4.27. Malgré le développement de composants spécifiques, on constate de manière empirique que tout calibrage satellitaire à l'intérieur d'une zone urbaine est à déconseiller, faute de fiabilité. Les parcours réalisés dans un environnement urbain montrent que la méthodologie choisie permet une adaptation des modèles au type de marche des différentes personnes. De par la diminution rapide des perturbations magnétiques en fonction de la distance, la position et le type de senseurs choisis, les lignes électriques de bus ont un effet minime sur le parcours proprement dit.

Dans le cas des personnes aveugles, les profils de marche peuvent se révéler encore plus spécifiques au vu de l'encombrement et de la connaissance du trajet. La détection de pas latéraux et arrière se justifie ici pleinement au vu des nombreux obstacles (présentoirs d'habits, publicité, ...) existants au centre ville, figure Fig. 4.28. La qualité de l'altitude absolue calculée est bien souvent limitée par la connaissance imprécise du géoïde. Les différences relatives, elles, peuvent dans certains cas particuliers être affinées par rapport à la résolution du baromètre utilisé. Prenant en compte une certaine normalisation des marches d'escaliers ainsi que des étages d'immeuble, la détection d'une situation donnée (montée-descente d'escaliers ou d'ascenseur) permet la correction des imprécisions de mesure. De cette façon, une précision altimétrique relative inférieure au mètre est couramment atteinte.

Certains trajets sont complexes et les trajectoires obtenues sont très proches de la réalité. Toutefois, en navigant uniquement à l'estime, il est relativement aisé de confondre le système. L'approche développée considère donc une certaine collaboration tacite de l'utilisateur: il ne doit pas chercher délibérément à induire le module en erreur. Ceci définit implicitement le domaine d'applications concernées et introduit la distinction entre localisation et suivi d'une personne (avec son approbation ou à son insu).

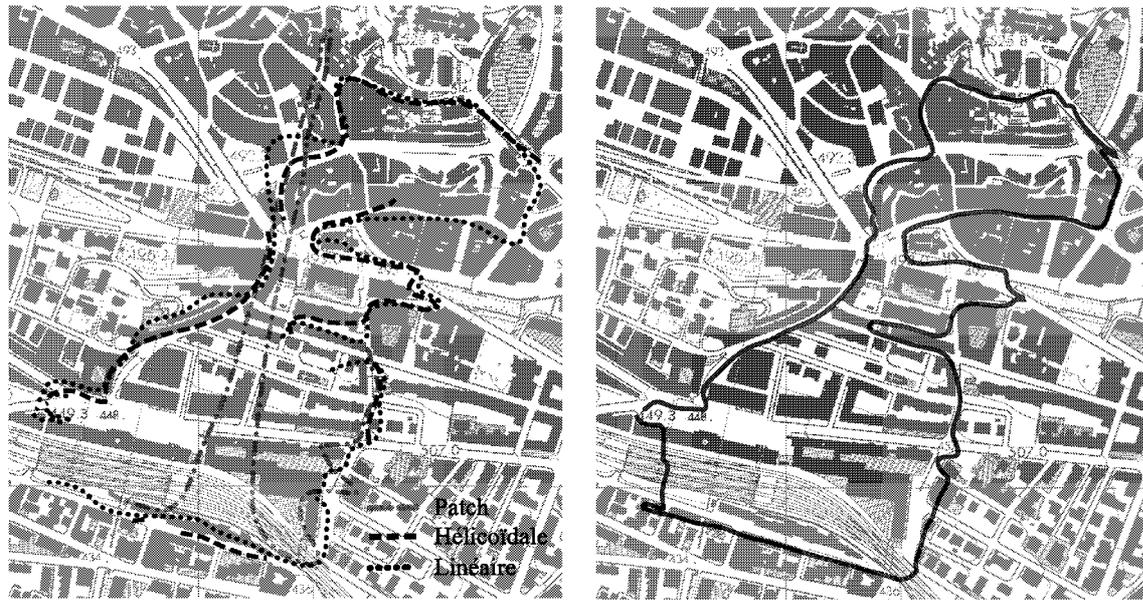


FIG. 4.27 – Trajectoires obtenues en ville de Lausanne en utilisant simultanément 3 récepteurs GPS identiques couplé à 3 antennes différentes. Les résultats montrent clairement le gain d'information obtenu par les deux antennes spécifiques à la navigation pédestre. Gauche: Une fois les signaux satellitaires totalement perdus, l'antenne patch ne permet pas de calculer une nouvelle position. Ceci est un cas extrême mais illustre bien la nécessité de composantes spécifiques à une telle application. Droite: Trajectoire calculée par le PNM avec compas magnétique uniquement. Seulement 5 positions GPS ont été utilisées sur le parcours pour calibrer les différents modèles et re-positionner la personne. Malgré quelques imprécisions, la trajectoire calculée est univoque et décrit sans ambiguïté le parcours effectué.

## Bibliographie

- Antoniou, A. (1993). *Digital Filters: Analysis, Design and Applications*. McGraw-Hill Inc.
- Baarda, W. (1968). A testing procedure for use in geodetic networks. Publications on geodesy, Netherland Geodetic Commission, Delft.
- Bromba, M. U. A. et Ziegler, H. (1981). Application hints for Savitzky-Golay digital smoothing filters. *Anal. Chem.*, 53:1583–1586.
- Epstein, Y., Stroschein, L. A., et Pandolf, K. B. (1987). Predicting metabolic cost of running with and without backpack loads. *Eur J. Appl. Physiol*, 56(5):495–500.
- Eston, R. G., Rowlands, A. V., et Ingledeu, D. K. (1998). Validity of heart rate, pedometry, and accelerometry for predicting the energy cost of children's activities. *the American Physiological Society*, pages 362–371.
- Farrell, J. et Barth, M. (1998). *The Global Positioning System & Inertial Navigation*. McGraw-Hill, New-York.
- Fischer, G. et Schnegg, P.-A. (1994). Up-dating the geomagnetic survey of Switzerland. Technical Report 27, Schweizerische Geophysikalische Kommission.
- Gelb, A. (1971). *Applied Optimal Estimation*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Goovaerts, H. G. et Rompelman, O. (1991). Coherent average technique - a tutorial review. *J. Biomed. Eng.*, 13:275–280.
- Grewal, M. S. et Andrews, A. P. (1993). *Kalman Filtering, Theory and Practice*. Prentice Hall.



FIG. 4.28 – Navigation à l'estime effectuée par un aveugle en plein centre ville. Le modèle de pas ayant été préalablement calibré, celui-ci prend en compte les pas latéraux et les différents événements brusques caractéristiques du déplacement des aveugles. Reporté sur le plan d'ensemble de la ville, la trajectoire (1'905 m) montre bien quelques imprécisions quant au côté de la route cheminée, mais celle-ci est déterminée de manière univoque. Le parcours longe une ligne de tram à courant alternatif. Le champ induit par cette dernière et les nombreuses voitures présentes le long des trottoirs influencent la trajectoire calculée de manière très discrète.

Hatch, R. R. (1982). The synergism of GPS code and carrier measurements. In *Proc. of the Fourth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Las Cruces*, pages 1287–1298.

Kunt, M. (1980). *Traitement numérique des signaux*. Traité d'électricité de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Editions Georgi.

MacGougan, G., Lachapelle, G., Klukas, R., Siu, K., Garin, L., Shwefelt, H., et Cox, G. (2002). Degraded GPS signal measurements with a stand-alone high sensitivity receiver. In *Proceedings of National Technical Meeting, The Institute of Navigation, San Diego, CA, Jan 28-30*.

Maybeck, P. S. (1994). *Stochastic Models, Estimation and Control*, volume 1-3. Navtech Book & Software Store.

Melanson, E. L., Jr, et Freedson, P. S. (1995). Validity of the computer science and applications, inc. (CSA) activity monitor. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, pages 934–940.

Merminod, B. (2000). Calcul de compensation. Cours EPFL.

Moix, S. (2002). Améliorer la navigation pédestre en intégrant un gyroscope et une boussole. Travail de diplôme, EPFL.

Orfanidis, S. J. (1996). *Introduction to signal processing*. Prentice-Hall.

- Pivarnik, J. M. et Sherman, N. W. (1989). Responses of aerobically fit men and women to uphill/downhill walking and slow jogging. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 22(1):127–130.
- Rompelman, O. et Ros, H. H. (1986). Coherent average technique - a tutorial review. part 1: Noise reduction and the equivalent filter. *J. Biomed. Eng.*, 8:24–29.
- Sankoff, D. et Kruskal, J. B. (1983). *Time Warps, String Edits, and Macromolecules: The Theory and Practice of Sequence Comparison*. Addison-Wesley Publishing Company.
- Schnegg, P.-A. (1999). A procedure for modelling spatiotemporal variations of the geomagnetic field - example of the 1998 model for Switzerland. *Revista Geofisica*, 43:133–140.
- Steiner, C. (2002). Reconnaissance de motifs dans le domaine de la navigation pédestre. Travail de diplôme, EPFL.
- Sterns, S. D. et David, R. A. (1996). *Signal Processing Algorithms in Matlab*. Prentice Hall.
- Stork, T. (2000). Electronic compass design using kmz51 and kmz52. Application Note AN00022, Philips Semiconductors.

## Chapitre 5

# Perspectives de recherche et conclusions

*Si un homme veut être sûr de son chemin,  
qu'il ferme les yeux et marche dans l'obscurité.*

Saint Jean de La Croix

L'existence de nombreuses technologies complémentaires dans le domaine du positionnement requiert des compétences variées. Celles-ci constituent autant de domaines de recherche dont l'intégration améliorera tant la fiabilité que la précision de l'information géographique délivrée. *De même qu'aujourd'hui personne ne peut ignorer l'heure, personne à l'avenir ne pourra se passer de connaître l'endroit exact où il se trouve.*

### 5.1 Perspectives de recherche

Le domaine de la navigation pédestre constitue un potentiel de recherches dans de multiples domaines. Celles-ci doivent cependant converger vers une augmentation de la précision, simultanément à la fiabilité du système. Comme mentionné dans Center (2001), la grande majorité des accidents causés par une erreur sur la position sont dus à une confiance totale des informations fournies par le récepteur GPS, ainsi qu'à une méconnaissance de la précision de ces dernières.

Il est évident qu'une telle situation n'est pas concevable pour la navigation en général et la navigation pour personnes aveugles en particulier. Les propositions suivantes visent à améliorer le module de mesure lui-même, tout comme les processus de traitement des données.

### 5.1.1 Amélioration du système

Pour qu'un système de localisation soit autonome, il faut qu'il n'utilise aucun signal extérieur sur lequel il n'a pas de contrôle. L'emploi de récepteurs GPS ou GSM (Global System for Mobile), bien qu'indispensable à tout positionnement absolu, rend le module dépendant. De par le faible coût de ceux-ci, le dédoublement de technologie permettrait de s'affranchir provisoirement d'un problème de réception aux dépens d'une précision constante. Cependant, même un dédoublement du système ne garantit pas une réception permanente des signaux. L'utilisation d'un récepteur GPS à haute sensibilité, peut, malgré le coût actuel plus élevé que son homologue commercial, augmenter sensiblement la performance générale du module.

Cette multiplication et/ou redondance de senseurs peut être avantageusement remplacée par l'information provenant des bases de données géoréférencées. L'information digitale tridimensionnelle offre des points de référence facilitant le contrôle d'une localisation absolue. Leur précision étant d'une dizaine de mètres, ils sont tout à fait comparables aux solutions de navigation GPS. Le seul inconvénient est cependant que seuls des endroits précis, présentant des changements de directions évidents, peuvent être retenus comme points de référence. Dans les bases de données actuelles à vocation routières, seuls les carrefours ou changement de tronçons offrent en règle générale de telles caractéristiques.

L'ajout d'un *système d'information géographique* (SIG), associé à une base de données (BD) géoréférencée ouvre des perspectives prometteuses dans le domaine de la cartographie interactive (*map matching*). Actuellement, les bases de données sont pensées et construites pour des applications routières. L'intégration d'informations pédestres tels que la largeur du trottoir, l'entrée des bâtiments, les plans détaillés des centres commerciaux, de même que les rues piétonnes permettrait des requêtes spécifiques à ce mode de déplacement. Des développements initiés avec Rouiller (2002) cherchent à recréer l'information pédestre à partir de bases de données routières existantes. La figure Fig. 5.1 présente le processus d'initialisation du système ainsi que la complexité de situations à prendre en compte lors de la traversée d'un carrefour. Une attention particulière sera apportée à la précision de l'information contenue dans la BD ainsi qu'à la propagation de l'incertitude lors de son traitement. L'apport du gyroscope, paragraphe 4.8.2, permet, selon la qualité considérée, des utilisations diverses. Les limitations temporelles et/ou méthodologiques sont indissociables des approches retenues. La fusion des deux mécanisations permettrait certainement un gain de commodité dans la procédure du levé de précision tout en diminuant fortement l'influence des perturbations magnétiques en navigation. Les pas étant détectés indépendamment du déplacement, ceux-ci pourraient être quantifiés par une double intégration temporelle intermittente de l'accélération. Connaissant de manière physiologique le commencement et la fin d'une enjambée, cette discontinuité favoriserait une ré-initialisation des senseurs à chaque pas.

### 5.1.2 Reconnaissance de motifs

Au-delà de la détection du mouvement, l'identification d'un événement et/ou d'une situation bien précise peut être d'intérêt. Si une première étape fut réalisée dans cette étude, la reconnaissance automatique du déplacement est une question complexe. On rencontre premièrement la variabilité intra- et inter-individuelle où l'approche peut être optimisée pour une personne bien particulière ou pour une plus grande variété d'utilisateurs. La personnalisation des paramètres via une période de calibrage n'étant pas toujours possible,

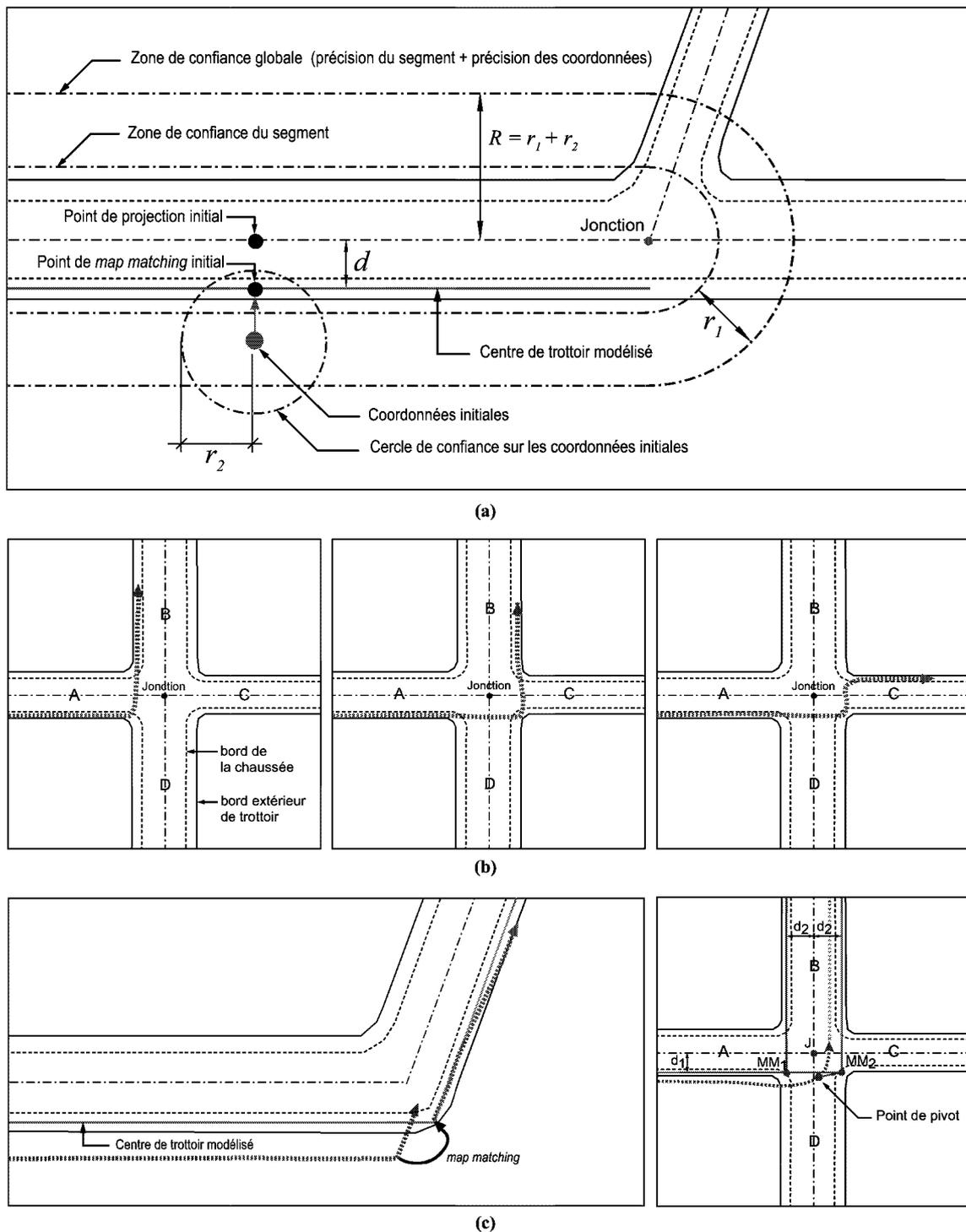


FIG. 5.1 – Cartographie interactive au service de la navigation pédestre. L'utilisation de bases de données routières requiert la modélisation du paysage piétonnier tout comme une stratégie d'initialisation de parcours se basant sur la route statistiquement la plus proche (a). Les algorithmes de positionnement doivent tenir compte d'une grande liberté de mouvements, principalement lors de carrefours (b). Dès qu'un changement de direction significatif est observé, une mise à jour de la position peut être envisagée. Diverses possibilités se présentent en fonction du type d'environnement rencontré (c).

le système devra être capable de s'adapter au nouvel individu. Conséquence de la diversité de mouvements possibles, le dictionnaire de motifs sera plus ou moins exhaustif en fonction du type d'application considéré. Une différenciation entre les événements isolés et une succession définie de motifs pourra déboucher sur une analyse également physiologique du style ainsi que des coutumes de déplacement de la personne. Bien entendu, la méthode devra être suffisamment robuste pour ne pas être affectée par des bruits liés à une mauvaise attache, ainsi qu'à des mouvements parasites du système.

En rêvant d'identifier une personne grâce à son profil de marche, le parallèle avec le traitement de la parole semble prometteur quant à l'utilisation de modèles de Markov cachés (HMM - Hidden Markov Models), ou similaires. Gardons cependant en mémoire, en paraphrasant Boite et al. (2000), qu'aucune technique ne pourra jamais compenser entièrement un mauvais choix des différents paramètres de marche. Une étude statistique approfondie de chaque phénomène, couplée à la création d'un dictionnaire d'événements accompagné des motifs correspondant, est donc indispensable.

## 5.2 Conclusions

Ce travail a représenté une démarche d'intégration pour la navigation pédestre de différentes technologies couramment utilisées dans la navigation de véhicules. Les spécificités de cette application rendant les méthodes traditionnelles difficilement utilisables, une approche physiologique et biomécanique de la marche fut entreprise. Les multiples domaines d'expertise intervenant tout au long de cette recherche ont permis la division de ce mémoire en trois chapitres principaux.

La première partie traite et analyse les différentes façons de marcher des êtres humains. Derrière les particularités individuelles, il a fallu, à l'aide de nombreux essais et parcours types, déterminer les phénomènes mesurables permettant de modéliser au mieux la vitesse instantanée et la taille des pas. En se basant sur les nombreuses études effectuées à l'intérieur de laboratoires, des tests furent réalisés dans des conditions les plus proches possibles de la vie de tous les jours. Il en résulte que si les relations se révèlent judicieuses, les valeurs de paramètres citées en référence doivent impérativement être adaptées aux caractéristiques de la personne.

En plus de la taille et du genre de l'individu, la forme physique jouera un rôle important dans l'adéquation des différents modèles. Pour tenir compte d'une telle diversité, une normalisation des modèles est indispensable. La cadence de marche influençant directement la vitesse plane et la taille des enjambées, l'agitation générale de la personne mesurée par accélérométrie se présente comme un indicateur pertinent bien que sensible au résultat du calibrage. L'influence de la pente sur la vitesse de déplacement et la taille des pas n'a pu être mise en évidence aussi distinctement que dans certains travaux préalables. Cet aspect est cependant pris en compte indirectement par la relation entre la fréquence de marche et les enjambées. La présence de motifs particuliers dans les signaux accélérométriques permet la détection et la différenciation de mouvements antéro-postérieurs et latéraux. Les mêmes essais ont été réalisés avec des personnes aveugles. Ils montrent que celles-ci modulent clairement leur vitesse en fonction du degré de sécurité dans lequel elles se sentent vis-à-vis de l'environnement. Mis à part des déplacements latéraux plus fréquents suite à la rencontre d'obstacles imprévus, les modèles développés pour les personnes voyantes peuvent être utilisés sans restriction pour les aveugles.

Dans la deuxième partie du travail, les différents phénomènes physiques ainsi que les techniques de mesures utilisées sont décrites. La mesure du champ magnétique terrestre permet la détermination de l'azimut de déplacement en zones magnétiquement stables. Lors de perturbations, des mesures gyroscopiques seront d'intérêt. La direction, tout comme la détection du mouvement, résulte du traitement des signaux accélérométriques. Les changements d'altitude sont déduits de la variation de pression atmosphérique mesurée par un baromètre. Permettant une localisation tri-dimensionnelle absolue, les positions et vitesses mesurées par satellites autorisent également le calibrage et la mise à jour des différents modèles physiologiques.

Le troisième volet présente les processus d'analyse de l'information en fonction du mode de traitement désiré (post-traitement et temps réel). Toutes les données sont collectées, synchronisées et stockées par un module développé au cours de ce travail. Une approche événementielle considérant le pas comme unité de mesure a été préférée à la mécanisation classique. Ce choix facilite le filtrage des azimuts de marche en supprimant les oscillations naturelles dues au déplacement. Divers calibrages et traitements ont été étudiés en fonction des données disponibles et des scénarii imposés. Ils permettent de déterminer le plan horizontal virtuel constant sur lequel viendront se projeter les vecteurs magnétiques. De même, les paramètres des modèles de marche, ainsi que la gestion de l'azimut en milieux magnétiquement sensibles y sont décrits. Dans le dernier cas, l'utilisation d'un gyroscope en opposition au gel du dernier azimut compassique fiable montre la nécessité d'une redondance de l'information sur la direction de marche. Les différents filtres et stratégies développées ont permis, par l'intermédiaire de nombreuses comparaisons, de déterminer les combinaisons optimales en fonction de l'application considérée. L'utilisation appropriée d'une position satellitaire entre autre information absolue a également été traitée.

Les principaux apports de cette étude sont:

- le **parallèle établi** entre une approche biomécanique de la marche et son utilisation à des fins de localisation
- l'**intégration appropriée** de différents senseurs et technologies couramment utilisés pour la navigation de véhicules au service de la navigation pédestre
- la **mise au point d'algorithmes de navigation** et de processus de calibrage appropriés aux spécificités de la marche prenant également en compte les caractéristiques individuelles de chacun.

Suite aux nombreux parcours réalisés, il est important de remarquer les profils de marche individuels des personnes rencontrées. Si les modèles adoptés permettent des estimations raisonnables de la vitesse et de la taille des pas directement en fonction des données physiques d'une personne, une mise à jour régulière des paramètres est nécessaire à la prise en compte des caractéristiques subjectives.

Connaître sa position en tout temps et de manière autonome n'est utile que dans un contexte où cette donnée n'est qu'une composante d'un dispositif plus complexe. En couplant de manière digitale la position tridimensionnelle d'une personne à une carte ou à un système d'information géographique, l'exploitation de la base de données associée fournit des indications sur l'environnement direct de la personne. L'utilisation de **cartes interactives** permet un positionnement ainsi qu'un calibrage des différents senseurs même lorsque la visibilité au ciel n'est pas possible. La présentation de l'information peut être fournie en continu ou à la demande, que ce soit de manière visuelle ou auditive et cela principalement pour les aveugles. Le message ainsi que son mode de transmission peuvent être adaptés au niveau de réceptivité de la personne. Ceci peut varier d'une description

détaillée du lieu lors d'une marche lente à une simple indication de direction pour les situations les plus urgentes.

Si un tel système peut être utilisé à de nobles fins tels le guidage de personnes malvoyantes et aveugles ou la localisation de personnes âgées ou malades, la frontière avec des applications de surveillance ou de suivi d'individus est mince. La différence entre localisation et suivi est bien marquée. Par **localisation** on entend la connaissance d'une position par rapport à certains points, à une certaine précision donnée. Le **suivi**, s'intéresse à une succession de positions dans le temps définissant une trajectoire. Ceci est actuellement déjà rendu possible par l'intermédiaire des cartes de crédit, bancaires ou tout simplement de fidélité, ainsi que par l'utilisation du téléphone, qu'il soit portable ou non.

La convergence des technologies telles que télécommunications, assistants personnels numériques (PDA) et systèmes de localisation autonomes permet les analyses et interprétations en temps réel des trajectoires effectuées. Si la détermination d'une position résulte bien souvent d'un travail scientifique, la gestion et l'utilisation de cette information dépend de décisions politiques. La confidentialité de la position des personnes doit être garantie afin qu'elle ne puisse être utilisée à son insu. Avec l'approbation de certaines lois visant à augmenter la sécurité du citoyen, telle la *loi 911* aux Etats-Unis, la frontière entre un service de secours et une activité de surveillance peut devenir de plus en plus mince. En s'intéressant à un pur défi scientifique, on se rend compte que celui-ci soulève de sérieuses questions de liberté individuelle et d'une possible intrusion dans la sphère privée (Clarke, 2001). Osons espérer que l'éthique l'emportera sur les applications commerciales et policées. Comme le mentionnait déjà Pythagore (Slosman, 1980): *Homme avisé! Observe deux choses par dessus tout: ne laisse à qui que ce soit prendre empire sur toi! et que ta plus grande félicité soit de vivre avec des êtres aussi libre que toi.*

Lausanne, le 6 janvier 2003

Quentin Ladetto

## Bibliographie

- Boite, R., Bourlard, H., Dutoit, T., Hancq, J., et Leich, H. (2000). *Traitement de la parole*. Electricité. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- Center, J. A. V. N. T. S. (2001). Vulnerability assessment of the transportation infrastructure relying on the global positioning system. Final report, Office of the Assistant Secretary for Transportation Policy, U. S. Department of Transportation.
- Clarke, R. (2001). Person-location and person-tracking: Technologies, risks and policy implications. *Information Technology & People*, 14(2):206–231.

Rouiller, J. (2002). Développement conceptuel d'un système de cartes interactives pour la navigation pédestre. Travail de diplôme, EPFL.

Slosman, A. (1980). *Le Biblion de Pythagore: livre des lois morales et politiques*. Robert Laffont, Paris.



# Curriculum Vitae

Prénom: **Quentin**  
Nom: **LADETTO**  
Date et lieu de naissance: 1<sup>er</sup> Novembre 1972 à Sion (Suisse)  
Nationalité: Suisse  
E-mail: Quentin.Ladetto@a3.epfl.ch

## Education

---

**1998–2002** Doctorant au laboratoire de Topométrie à la Faculté de l'Environnement Naturel, Architectural et Construit (ENAC) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Directeur de thèse: Prof. Bertrand Merminod  
18 Décembre, 2002 Thèse de doctorat: "Capteurs et algorithmes pour la localisation autonome en mode pédestre".  
Avril-Novembre, 2000 Stage auprès du Prof. Klaus-Peter Schwarz à l'Université de Calgary, Canada

**1993–1998** Diplôme d'ingénieur EPF en génie rural et géomètre  
31 mars, 1998 *Travail de diplôme*: "Géodésie en Colombie: propositions pour un réseau cohérent et opérationnel." Superviseur: Prof. Bertrand Merminod.

Juin **1992** *Maturité Type C*, Lycée-Collège des Creusets, Sion.

## Expérience professionnelle

---

2001–2003 Responsable scientifique du projet CTI (Commission pour la Technologie et l'Innovation) "*FitNav - a combined sensor system for integrated personal navigation*" en collaboration avec Leica Vectronix AG  
Consultant pour les entreprises *Locametric LLC*, Manassas-VA, et *Sendero Group LLC*, Davis - CA, USA.

2000 Planification et membre enseignant du cours *Información satelital y procesamiento de datos GPS* à l' Universidad Catolica Boliviana, Cochabamba, Bolivie.

## Distinctions

---

2002 Lauréat du *Swiss Technology Award*

2001 Prix APLE de l'invention EPFL 2000 pour le dépôt de la patente *Pedestrian Navigation Method and Apparatus Operative in a Dead Reckoning Mode*

2000 Lauréat de la *2000 Student Competition* de l'US Institute of Navigation

1999 1<sup>er</sup> prix du *GPS World Seventh Annual Applications Contest* avec le sujet *Taking Skiing to New Heights*

## Langues

---

Français (langue maternelle), Anglais (courant), Allemand (courant), Italien (courant), Espagnol (courant)

## Publications principales

---

Ladetto Q., van Seeters J., Sokolowski S., Sagan Z., Merminod B. (2002) *Digital Magnetic Compass and Gyroscope for Dismounted Soldier Position & Navigation*, Military Capabilities enables by Advances in Navigation Sensors, Sensors & Electronics Technology Panel, NATO-RTO meetings, Istanbul, Turkey, 14-16 October

Ladetto Q., Merminod B. (2002) *Digital Magnetic Compass and Gyroscope Integration for Pedestrian Navigation*, 9th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, Russia, May 27-29.

Ladetto Q., Merminod B. (2001) *In Step with INS: Navigation for the Blind, Tracking Emergency Crews*, GPS-World, Octobre 2002, pp. 30-38.