



**HAL**  
open science

# Apport des modèles numériques d'élévation pour l'enrichissement des cartes de navigation par fusion multi-capteurs

Hiba Al Assaad

► **To cite this version:**

Hiba Al Assaad. Apport des modèles numériques d'élévation pour l'enrichissement des cartes de navigation par fusion multi-capteurs. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université du Littoral Côte d'Opale; Université Libanaise, 2020. Français. NNT : 2020DUNK0558 . tel-03066836

**HAL Id: tel-03066836**

**<https://theses.hal.science/tel-03066836v1>**

Submitted on 15 Dec 2020

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

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



Ecole Doctoral  
Sciences pour l'ingénieur



Université Lille Nord de France  
Pôle de Recherche  
et d'Enseignement Supérieur



Université Libanaise  
Ecole Doctorale  
Sciences et Technologie

## THÈSE

pour obtenir le grade de docteur délivré par

**l'Université du Littoral Côte d'Opale et  
l'Université Libanaise**

**Spécialité : Sciences et technologies de l'information et de la  
communication. Traitement du signal et des images**

**Apport des modèles numériques d'élévation  
pour l'enrichissement des cartes de navigation  
par fusion multi-capteurs**

présentée par

**Hiba AL ASSAAD**

Soutenue le 16 octobre 2020 devant le jury composé de :

**Président :**

M. Patrick Danès

Professeur, Université de Toulouse, LAAS-CNRS, France

**Rapporteurs :**

Mme. Farah Chehade

Maître de Conférences, HDR, Université de Technologie de Troyes, France

M. Yassine Ruichek

Professeur, Université de Belfort-Montbéliard, France

**Examineur :**

M. Azzam Mourad

Maître de Conférences, Université Libano-Américaine, Liban

**Directeurs de thèse :**

M. Jean-Charles Noyer

Professeur, Université du Littoral Côte d'Opale, LISIC, France

M. Ahmad Shahin

Professeur, Université Libanaise, LAMA, Liban

**Encadrants de thèse :**

M. Christophe Boucher

Maître de Conférences, Université du Littoral Côte d'Opale, France

M. Ali Daher

Maître de Conférences, Université Libanaise, Liban



## Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer mes plus profonds remerciements à mes deux directeurs de thèse Monsieur Jean-Charles NOYER et Monsieur Ahmad SHAHIN pour leur disponibilité, leurs précieux conseils et leur implication durant ces années de thèse. Je tiens également à remercier mes encadrant Monsieur Christophe BOUCHER et Monsieur Ali DAHER pour ses aides, ses disponibilités, ses judicieux conseils pendant toute la durée de ma thèse. Leurs encouragements et leur engagement m'ont permis d'enrichir mes connaissances, d'acquérir des méthodes de travail et de mener à bien mes travaux. Le travail présenté dans ce rapport a été réalisé au sein du Laboratoire d'Informatique Signal et Image de la Côte d'Opale, situé à Calais et Laboratoire Math et Applications au Liban. Il a été financé par une bourse de doctorat de l'Université ULCO et de l'Université Ibanaise.

J'ai le plaisir de remercier tous les membres du jury pour m'avoir fait l'honneur de participer à l'évaluation de mes travaux de thèse : M. Patrick Danès, Mme. Farah Chahade, M. Yassine Ruichek et M. Azzam Mourad.

Je terminerai ce préambule en remerciant ma famille et mes amis qui m'ont supporté pendant toutes ces années de thèse. Je remercie enfin mes parents pour leurs encouragements infaillibles et pour leurs soutiens durant toutes mes années et à qui cet ouvrage est dédié.

Hiba AL ASSAAD

# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>7</b>
<b>1 Etat de l'art sur les systèmes de navigation</b>	<b>9</b>
1.1 Navigation par satellites	9
1.1.1 Système GPS	9
1.1.1.1 Mesures GPS	12
1.1.1.2 Calcul du positionnement GPS	16
1.1.1.3 Erreurs du système GPS	20
1.1.2 Amélioration des performances du système GPS	24
1.1.2.1 Système DGPS	24
1.1.2.2 Système EGNOS	25
1.1.2.3 Système WAAS	25
1.1.3 Autres systèmes GNSS	26
1.1.3.1 Système GLONASS	26
1.1.3.2 Système GALILEO	26
1.1.3.3 Système Beidou	28
1.2 Navigation à l'estime	28
1.2.1 Odométrie	29
1.2.1.1 Erreurs d'odométrie	31
1.2.2 Systèmes inertiels	32
1.2.2.1 Accéléromètres	33
1.2.2.2 Gyromètres	34
1.2.2.3 Erreurs du système inertiel	37
1.2.3 Système de navigation hybrides GPS/INS	39
1.2.3.1 Intégration par couplage lâche	39
1.2.3.2 Intégration par couplage serré	40
1.3 Navigation à l'aide des cartes numériques	41
1.3.1 Cartes routières numériques 2D	42
1.3.1.1 Méthodes de localisation géométriques	43
1.3.1.2 Méthodes de localisation topologiques	45
1.3.1.3 Autres méthodes de localisation	45

1.3.2	Modèles numériques de terrain . . . . .	46
1.3.2.1	Modèle SRTM . . . . .	47
1.3.2.2	Modèle ASTER . . . . .	48
1.3.2.3	Extension aux cartes de navigation 3D . . . . .	49
1.4	Méthodes d'estimation dynamique . . . . .	50
1.4.1	Filtrage de Kalman . . . . .	50
1.4.1.1	Prédiction . . . . .	50
1.4.1.2	Correction . . . . .	51
1.4.2	Filtrage de Kalman étendu . . . . .	51
1.4.3	Filtrage particulaire . . . . .	52
1.4.3.1	Cadre général . . . . .	52
1.4.3.2	Echantillonnage séquentiel par importance . . . . .	53
1.4.3.3	Echantillonnage avec ré-échantillonnage par impor- tance . . . . .	55
1.4.3.4	Méthodes de ré-échantillonnage . . . . .	56
1.5	Conclusion . . . . .	58
<b>2</b>	<b>Estimation des position et attitude d'un véhicule par fusion de données multi-capteurs utilisant le filtrage non-linéaire</b>	<b>59</b>
2.1	Introduction . . . . .	59
2.2	Modélisation du système de navigation 3D . . . . .	61
2.2.1	Equation de dynamique du véhicule . . . . .	61
2.2.2	Equations de mesure . . . . .	62
2.2.2.1	Mesure du positionnement GNSS . . . . .	62
2.2.2.2	Mesure de l'accélération du système inertiel . . . . .	63
2.2.2.3	Mesure du réseau routier numérique OSM . . . . .	64
2.2.2.4	Mesure du modèle numérique d'élévations ASTER GDEM V2 . . . . .	65
2.3	Estimation de la localisation 3D et l'attitude du véhicule . . . . .	67
2.3.1	Etape d'initialisation . . . . .	68
2.3.2	Etape d'évolution des particules . . . . .	68
2.3.3	Etapes de correction . . . . .	68
2.3.3.1	Intégration des données GNSS . . . . .	70
2.3.3.2	Intégration des données d'accélération . . . . .	70
2.3.3.3	Gestion des données du réseau routier OSM . . . . .	71
2.3.3.4	Gestion des données du modèle numérique d'éléva- tions GDEM ASTER V2 . . . . .	73
2.3.4	Estimation de la localisation 3D et l'attitude partielle . . . . .	75
2.3.5	Ré-échantillonnage des particules . . . . .	76
2.4	Résultats expérimentaux . . . . .	76
2.4.1	Contexte d'expérimentation . . . . .	77

2.4.2	Estimation du mouvement du véhicule . . . . .	78
2.4.3	Estimation de la position du véhicule . . . . .	83
2.4.4	Estimation de l'attitude partielle du véhicule . . . . .	84
2.5	Conclusion . . . . .	85
<b>3</b>	<b>Estimation des pentes des segments routiers par fusion multi-capteurs</b>	<b>90</b>
3.1	Position du problème . . . . .	90
3.2	Nouvelle méthode de gestion des données d'élévation . . . . .	92
3.3	Equations de mesure . . . . .	96
3.3.1	Mesure de l'angle de tangage . . . . .	96
3.3.2	Mesure du modèle numérique d'élévation World 30 . . . . .	96
3.4	Estimation des inclinaisons de segments routiers . . . . .	97
3.4.1	Intégration de l'angle de tangage . . . . .	97
3.4.2	Intégration des données du MNE World 30 . . . . .	99
3.4.3	Calcul de la pente des segments de routes . . . . .	100
3.5	Contexte expérimental . . . . .	100
3.5.1	Estimation du mouvement et de la position du véhicule . . . . .	100
3.5.2	Estimation de la pente du segment routier . . . . .	102
3.6	Conclusion . . . . .	106
	<b>Conclusion générale et perspectives</b>	<b>107</b>
<b>A</b>	<b>Représentation de l'attitude d'un véhicule</b>	<b>109</b>
A.1	Matrice de rotation . . . . .	109
A.2	Angles d'Euler (AE) et de Cardan (AC) . . . . .	111
A.3	Quaternions . . . . .	113
<b>B</b>	<b>Environnement matériel et logiciel</b>	<b>117</b>
B.1	Récepteur u-blox EVK-M8U . . . . .	117
B.2	Logiciel dédié au récepteur EVK-M8U : u-center . . . . .	118
B.3	Traitement des données du récepteur u-blox EVK-M8U . . . . .	119
B.3.1	Données brutes du récepteur u-blox EVK-M8U . . . . .	120
B.3.1.1	Message des données du positionnement . . . . .	120
B.3.1.2	Message des données d'accélération . . . . .	121
B.3.1.3	Message des données d'attitude . . . . .	122
B.4	Traitement des données d'accélération . . . . .	123
B.4.1	Calibrage des données brutes . . . . .	124
B.4.2	Transformation d'accélération du repère mobile $B$ au repère de navigation $NED$ . . . . .	124



# Introduction

L'objectif visé dans cette thèse est de proposer une modélisation générique du problème de fusion multi-capteurs à partir d'approches de filtrage particulaire qui permet d'intégrer des mesures extéroceptives (GNSS, cartes routières numériques, MNE, etc. ) et proprioceptives (centrale inertielle, par exemple). Ce système a pour but d'estimer l'accélération, la vitesse et la position 3D avec l'attitude d'un véhicule terrestre. Il va permettre également d'estimer des paramètres 3D importants pour l'enrichissement des cartes de navigation. Le système GNSS (Global Navigation Satellite System) est la source centrale de mesures dans notre système de navigation car il fournit des informations sur la position 3D du véhicule. Il est complété par une centrale inertielle qui délivre des mesures supplémentaires sur le mouvement relatif du véhicule (accélération, vitesse angulaire) et son attitude (lacet, tangage, roulis). Enfin, le système de positionnement s'appuie sur des cartes de navigation et des modèles numériques d'élévation. La problématique scientifique réside ici dans la capacité de proposer et disposer de méthodes robustes d'appariement.

Nous proposons un algorithme de fusion général qui repose sur un filtre particulaire permettant de prendre en compte les non-linéarités des différentes sources de mesures. Nous utilisons également un critère d'appariement statistique basé sur le calcul de la distance de Mahalanobis pour corriger la position au sol avec les données cartographiques. Pour limiter les erreurs de positionnement en altitude inhérentes au positionnement GNSS nous avons choisi de proposer une méthode d'intégration des données d'élévation MNE. Cette méthode est basée sur une modélisation géométrique désignée par « méthode de Fenêtre Glissante Adjacente » (FGA).

Ce mémoire de thèse, décomposé en trois chapitres, est organisé de la façon suivante. Le premier chapitre présente un état de l'art sur les principales techniques de localisation par satellites et de navigation à l'estime, en décrivant le fonctionnement du système GPS ainsi que des capteurs inertiels (accéléromètre, gyroscope) et les différents types d'erreurs associés. Nous avons aussi présenté les différents types de cartes numériques en focalisant sur les cartes routières numériques et les modèles numériques d'élévation. Les principes de fonctionnement



de ces capteurs, leurs avantages et inconvénients sont présentés de même que les différentes méthodes de mise en correspondance cartographique. Ensuite, nous présentons différentes méthodes d'estimation dynamique en détaillant leurs avantages et inconvénients.

Dans le deuxième chapitre, nous développons notre méthode de fusion multi-capteurs par filtrage particulière pour la localisation des véhicules. Ce modèle d'estimation est basé sur la fusion des mesures de position GNSS, d'accélération délivrées par un capteur inertiel et de bases de données cartographiques reposant sur la carte routière OSM et le MNE ASTER GDEM V2. Cette méthode de fusion repose sur une structure centralisée pour estimer le mouvement, la position 3D et l'attitude partielle du véhicule. Après les corrections issues des étapes de prise en compte des mesures GNSS et INS, une étape de mise en correspondance cartographique avec les données OSM est appliquée afin de corriger la position 2D estimée du véhicule. Pour cela, nous nous basons sur le calcul de la distance de Mahalanobis comme métrique d'appariement de sorte à intégrer les erreurs intrinsèques de la carte routière numérique. Afin d'améliorer l'estimation de l'altitude du véhicule, une méthode de triangulation est appliquée aux données MNE. Pour présenter les performances et l'efficacité de la méthode en termes d'estimation du mouvement et de la position 3D, celle-ci est appliquée à une partie du réseau routier de la ville de Calais située dans le Nord de la France.

Dans le troisième chapitre, nous présentons une nouvelle méthode de modélisation des données d'élévation afin d'améliorer l'estimation de l'altitude du véhicule et d'estimer les inclinaisons des segments routiers parcourus par le véhicule. L'intégration des mesures d'angle de tangage avec les mesures de position et d'accélération améliore significativement l'estimation des paramètres du vecteur d'état. Durant l'étape de gestion du MNE World 30, nous avons utilisé la méthode FGA qui permet de rendre plus robuste l'estimation. La modélisation GNSS/INS/OSM/World 30 est utilisée pour estimer les inclinaisons des segments routiers parcourus dans le même contexte expérimental que dans le chapitre précédent.

Nous concluons cette thèse en présentant un bilan général de l'ensemble de nos contributions et en évoquant de nouvelles perspectives de recherche.

# Chapitre 1

## Etat de l'art sur les systèmes de navigation

### 1.1 Navigation par satellites

#### 1.1.1 Système GPS

Le système de navigation GPS (Global Positioning System) est un système de positionnement par satellites. Il a été développé, dans les années 1960 à 1970, par le département de la défense (DOD) pour l'armée américaine [96, 68]. Il est totalement opérationnel depuis février 1994. Par la suite, il est devenu disponible pour les utilisateurs civils. Le GPS fournit des services à un nombre illimité d'utilisateurs puisque les récepteurs fonctionnent de manière passive. La référence de temps du GPS dans laquelle toutes les mesures sont exprimées est le temps UTC (Universal Time Coordinated), qui offre la possibilité de synchroniser l'heure des utilisateurs du monde entier.

La constellation NAVSTAR (NAVigation System by Timing And Ranging) est composée de 24 satellites répartis sur six orbites circulaires. Chaque orbite contient 4 satellites inclinée de  $55^\circ$  espacée de  $60^\circ$  de l'autre orbite et située à une altitude de 20184 km (Fig. 1.1). Chaque satellite prend 11 heures 58 minutes 2 secondes pour faire un tour complet du globe terrestre. Les satellites sont répartis de manière qu'en n'importe quel point de la surface terrestre et à n'importe quelle heure de la journée, au moins 6 satellites soient visibles, avec des angles d'élévation au-dessus de  $5^\circ$ . Chaque satellite couvre 78% de l'hémisphère. Le système GPS est le plus employé pour la navigation et fournit une position tridimensionnelle (latitude, longitude et altitude) avec une grande précision. Le système GPS délivre à tout utilisateur muni d'un récepteur adéquat les informations de position, vitesse et temps de manière continue et instantanée dans le système de référence mondial

WGS-84 (World Geodetic System 1984), en tout endroit sur la Terre. Un réseau de 5 stations terrestres se trouve aux États-Unis, pour le contrôle et la surveillance des satellites. Elles envoient des données de navigation et de contrôle aux satellites.

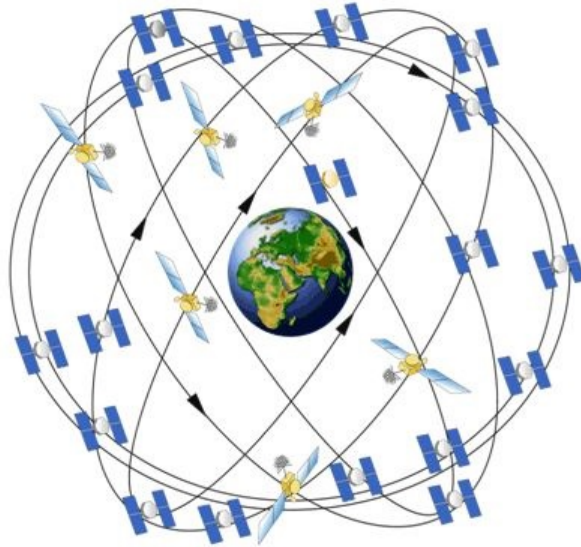


FIGURE 1.1 – Constellation des satellites du système GPS [1].

Chaque satellite GPS contient un oscillateur stable ; à partir d'une fréquence  $f_0=10,23$  MHz fondamentale, il émet sur deux ondes porteuses (L1 et L2) de fréquences  $f_1=1575,42$  MHz et  $f_2=1227,60$  MHz, en utilisant une technique appelée "accès multiple par répartition de code" (CDMA Code Division Multiple Access). Elles sont générées grâce à l'horloge atomique embarquée à bord de chaque satellite. Le satellite utilise ces deux porteuses pour la transmission des données de navigation à l'aide d'un modulateur qui met en œuvre deux codes binaires pseudo-aléatoires pour l'émission : le code C/A (Coarse/Acquisition) et le code P (Precision) [68]. Le code C/A module la porteuse L1 avec une longueur d'onde  $\lambda =293$  m pour l'utilisation civile, contrairement au code P qui lui module les deux porteuses L1 et L2 avec une longueur d'onde  $\lambda=29,3$  m pour utilisation militaire. Les satellites utilisent les codes C/A et P pour déterminer le délai de transmission. Le message de navigation est envoyé sur un signal basse fréquence de 50 Hz (Fig. 1.2). Une troisième onde porteuse L5, de fréquence = 1176,45 MHz est générée

mais uniquement utilisée pour les applications critiques comme les navigations aériennes [131].

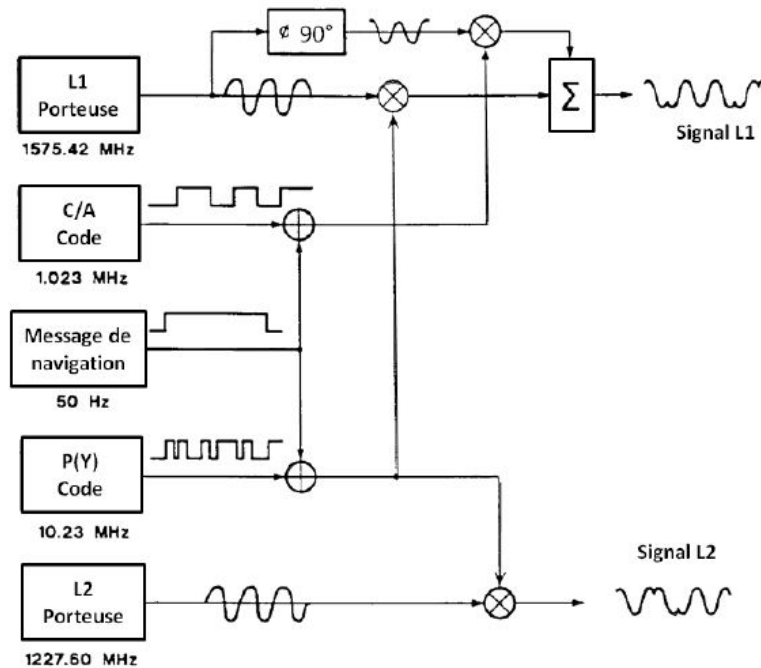


FIGURE 1.2 – Modulateur du signal GPS [53].

Le système GPS comprend trois secteurs dédiés à des fonctions spécifiques :

- **le secteur spatial** comporte les 24 satellites qui tournent autour du globe terrestre sur les six orbites ;
- **le secteur de contrôle** assure la surveillance des satellites, pour vérifier et corriger les paramètres d'orbite et leurs horloges qui sont téléchargées aux satellites une fois par jour ;
- **le secteur des utilisateurs** regroupe l'ensemble des récepteurs GPS qui réalisent le calcul de positionnement en temps réel. Les récepteurs contiennent des antennes qui identifient la qualité du signal, un système électronique composé d'horloge et un calculateur, et une batterie qui assure l'autonomie du système.

Le principe du fonctionnement du GPS est basé sur le temps de la propagation du signal entre un satellite et le récepteur. Chaque mesure de distance sur un satellite définit une sphère dont le centre est le satellite et le rayon est la

distance satellite-récepteur. Déterminer la position 3D du récepteur nécessite trois satellites visibles et l'utilisation de la méthode de trilatération. La trilatération utilise la géométrie des sphères pour déterminer la position exacte pour les systèmes de navigation. L'intersection de ces trois sphères définies par chaque satellite visible indique la position du récepteur.

### 1.1.1.1 Mesures GPS

Les mesures GPS sont à la base des mesures de temps de parcours des signaux pour déterminer les distances géométriques entre le récepteur et les satellites et pour calculer la position du récepteur. Il existe trois types de mesures GPS disponibles pour l'utilisateur. La première est la pseudo-distance qui est obtenue à partir de la mesure du temps de parcours d'un code C/A et/ou P. La deuxième provient de la différence entre la phase du signal reçu et la phase de l'oscillateur du récepteur. Une troisième mesure est disponible en déterminant la fréquence Doppler sur la porteuse (L1 et/ou L2) [68].

#### 1.1.1.1.1 Mesures de pseudo-distance

Mesurer la pseudo-distance nécessite la connaissance des codes C/A et P. Le code est généré par le récepteur et le satellite à un instant  $t$ . Le récepteur reçoit le code généré par le satellite avec un retard de  $\Delta t$  mis par l'onde pour parcourir le chemin satellite-récepteur. La comparaison entre le signal venant du satellite et le signal de récepteur permet de mesurer le délai de propagation  $\Delta t$  (Fig. 1.3); cela est dû à la non-synchronisation entre les horloges du satellite et du récepteur. Ce délai d'horloge est considéré comme une erreur sur la mesure de la distance satellite-récepteur. De ce fait, cela nécessite au moins quatre satellites visibles pour déterminer la position 3D  $(x, y, z)$  et le délai d'horloge  $\Delta t$ . On obtient la pseudo-distance  $P_R^S$  en multipliant ce délai de propagation par la vitesse de la lumière  $c$  (Eq. 1.1).

$$P_R^S = c.\Delta t = c.(t_R^r - t_S^e) \quad (1.1)$$

où :

- $P_R^S$  est la pseudo-distance entre le satellite  $S$  et le récepteur  $R$ ,
- $c$  est la vitesse de la lumière qui vaut 299 792 458 m/s (environ 300 000 km/s ),
- $t_R^r$  est le temps de réception du code dans l'échelle de temps récepteur,
- $t_S^e$  est le temps d'émission du code dans l'échelle de temps satellite.

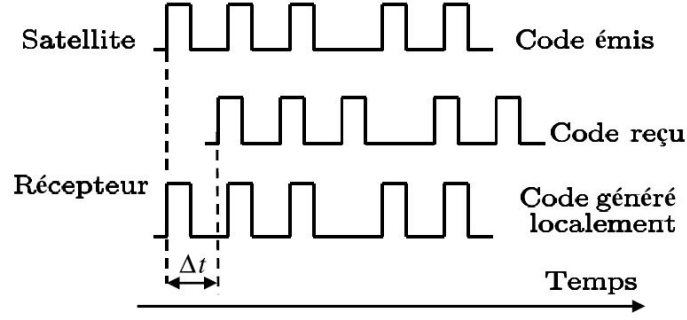


FIGURE 1.3 – Mesure de la pseudo-distance [78].

Il existe un décalage entre le temps d'émission satellite  $dt^e$  et de réception récepteur  $dt^r$ . Ces décalages sont dus à la non-synchronisation des horloges des satellites et récepteur par rapport au temps GPS (Eq. 1.2 et 1.3) :

$$t_{\text{GPS}}^e = t_S^e - dt^e \quad (1.2)$$

$$t_{\text{GPS}}^r = t_R^r - dt^r \quad (1.3)$$

où :

–  $dt^e$  est le décalage entre l'horloge du satellite et le temps GPS. Il est calculé en fonction des paramètres de correction d'horloge transmis par le message de navigation ( $a_{f0}$ ,  $a_{f1}$  et  $a_{f2}$ ) (Eq. 1.4).

$$dt^e = a_{f0} + a_{f1}(t_S^e - toc) + a_{f2}(t_S^e - toc)^2 + \Delta t_{\text{rel}} \quad (1.4)$$

où :

–  $a_{f0}$  est le décalage entre le temps satellite et le temps GPS,  
–  $a_{f1}$  est la dérive (offset) de l'horloge du satellite,  
–  $a_{f2}$  est la variation de la dérive (accélération) de l'horloge du satellite,  
–  $toc$  est le temps de référence des coefficients de l'horloge du satellite,  
–  $\Delta t_{\text{rel}}$  est la correction relativiste à apporter au décalage d'horloge, elle est de la forme (Eq. 1.5) :

$$\Delta t_{\text{rel}} = F.e.\sqrt{a}.\sin(E) \quad (1.5)$$

où :

–  $F$  est une constante égale à  $-4,442810^{-10}$ ,  
–  $e$  est l'excentricité de l'orbite du satellite ( $e=0,081819191043$ ),  
–  $a$  est le demi-grand axe de l'orbite du satellite ( $a = 6378137$  m),

- $E$  est l'anomalie excentrique,
  - $dt^r$  est estimé lors du calcul en comparant les signaux de plusieurs satellites.
- La pseudo-distance corrigée des erreurs d'horloges s'écrit donc (Eq. 1.6) :

$$P_R^S = c.(t_{\text{GPS}}^r - t_{\text{GPS}}^e) + c(dt^r - dt^e) = \rho_R^S + c(dt^r - dt^e) \quad (1.6)$$

où :  $\rho_R^S$  est la distance géométrique réelle entre le satellite GPS ( $S$ ) et le récepteur ( $R$ ). Elle est exprimée en fonction des coordonnées cartésiennes de la position du satellite ( $x_S, y_S, z_S$ ) et de la position du récepteur ( $x, y, z$ ), présente ci-dessous (Eq. 1.7) :

$$\rho_R^S = \sqrt{(x_S - x)^2 + (y_S - y)^2 + (z_S - z)^2} \quad (1.7)$$

La pseudo-distance effectivement mesurée s'écrit alors (Eq.1.8) :

$$P_R^S = \sqrt{(x_S - x)^2 + (y_S - y)^2 + (z_S - z)^2} + c(dt^r - dt^e) \quad (1.8)$$

Cette dernière équation ne tient pas compte des phénomènes influençant la propagation du signal GPS dues particulièrement à la propagation dans l'atmosphère.

### 1.1.1.1.2 Mesures de phase

Les récepteurs déterminent directement la mesure de phase en calculant la différence de la phase du signal reçu par le récepteur et la phase du signal généré par l'oscillateur à quartz interne au récepteur qui est une réplique du signal satellite. Cette mesure de phase ne permet pas de connaître la phase de battement total mais seulement sa partie fractionnaire (Fig. 1.4). Cette partie est nommée "ambiguïté entière" de la mesure de phase.

L'équation d'observation qui introduit les décalages des horloges par rapport au temps GPS s'écrit donc (Eq.1.9) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_R^S = \Phi(t_R^r) - \Phi(t_S^e) - N_R^S(t_R^r) \\ = f.(t_R^r - t_S^e) - N_R^S(t_R^r) \\ = f.(t_{\text{GPS}}^r - t_{\text{GPS}}^e) + f.(dt^r - dt^e) - N_R^S(t_R^r) \\ = \frac{1}{\lambda}\rho_R^S + f.(dt^r - dt^e) - N_R^S(t_R^r) \end{array} \right. \quad (1.9)$$

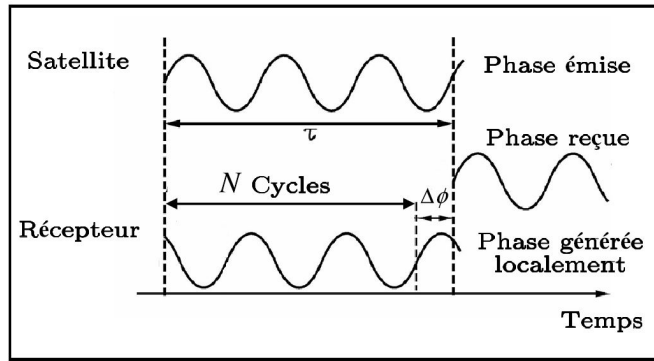


FIGURE 1.4 – Mesures de phase [78].

où :

- $f$  est la fréquence  $f_1$  ou  $f_2$  de l'onde porteuse L1 ou L2,
- $\lambda$  la longueur d'ondes 19,05 cm ou 24,45 cm des porteuses L1 ou L2 respectivement,
- $\rho_R^S$  la distance géométrique entre le satellite  $S$  à l'instant  $t_{GPS}^e$  et le récepteur  $R$  à l'instant  $t_{GPS}^r$ ,
- $N_R^S$  la partie entière inconnue de cycles écoulés au début de la mesure.

L'inconvénient majeur de cette technique de positionnement reste la phase d'initialisation pouvant prendre plusieurs dizaines de secondes, ce qui peut être très pénalisant dans des situations de perte fréquente du signal GPS.

### 1.1.1.1.3 Mesures de fréquence Doppler

La mesure de fréquence Doppler se fait par une soustraction entre la fréquence reçue et la fréquence nominale de transmission causée par le mouvement relatif entre le satellite et le récepteur. Elle est utilisée pour déterminer la vitesse instantanée de récepteurs mobiles et pour corriger les sauts présents dans les mesures de phase. Le décalage en fréquence observé sur l'onde porteuse L1 ou L2 s'écrit comme suit (Eq. 1.10) :

$$\dot{\Phi}_R^S = \frac{1}{\lambda} \dot{\rho}_R^S + f \cdot (dt^r - dt^e) \quad (1.10)$$

avec :

$$\dot{\rho}_R^S = \frac{[(x_S - x)(\dot{x}_S - \dot{x}) + (y_S - y)(\dot{y}_S - \dot{y}) + (z_S - z)(\dot{z}_S - \dot{z})]}{\rho_R^S} \quad (1.11)$$



où :

- $\dot{\rho}_R^S$  est la vitesse relative du satellite par rapport au récepteur,
- $\rho_R^S$  est la distance géométrique entre le satellite et le récepteur,
- $(x_S, y_S, z_S)$  et  $(x, y, z)$  sont les coordonnées de la position du satellite et du récepteur,
- $(\dot{x}_S, \dot{y}_S, \dot{z}_S)$  et  $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$  sont les composantes de la vitesse du satellite et du récepteur.

### 1.1.1.2 Calcul du positionnement GPS

Nous présentons dans cette partie la méthode de calcul des coordonnées tridimensionnelles du centre de phase d'antenne réceptrice, exprimées dans le référentiel mondial du GPS (WGS-84), en utilisant les mesures de pseudo-distance sur le code C/A.

#### 1.1.1.2.1 Systèmes de référence

Les quatre systèmes de référence impliqués dans le calcul de la position GPS sont le système inertiel ECI, le système terrestre ECEF, le système de navigation NED (ou ENU) et le système géocentrique WGS-84 :

- le système inertiel ECI (Earth Centred Inertial) est un repère orthogonal qui ne tourne, ni accélère, par rapport à l'univers. Son origine est au centre de masse de la Terre et les axes sont dirigés dans des directions fixes par rapport aux étoiles. Le plan  $XY$  coïncide avec le plan équatorial de la Terre, l'axe  $X$  est dirigé vers l'équinoxe, et l'axe  $Z$  en direction de l'axe de rotation de la terre autour du soleil. L'axe  $Y$  forme le repère orthogonal selon la règle de la main droite. La détermination et la prévision ultérieure des orbites des satellites GPS sont effectuées dans un système de coordonnées ECI.
- le système terrestre ECEF (Earth Centered Earth fixed) : le repère ECEF tourne avec la Terre à une vitesse de rotation par rapport au repère inertiel  $w_{ie} = 7.292115 \times 10^{-5}$  rad/s. Il est utilisé pour exprimer la position selon les coordonnées cartésiennes  $(x, y, z)$  et géodésiques (latitude, longitude et altitude ellipsoïdale)(Fig. 1.5). C'est un repère orthogonal dont l'origine coïncide avec le centre de la Terre. Les axes  $X_{ECEF}$  et  $Z_{ECEF}$  sont dirigés vers l'intersection du plan d'équateur avec le méridien de Greenwich et vers le pôle Nord respectivement, et l'axe  $Y_{ECEF}$  vers l'Est selon la règle de la main droite.

- le système de navigation NED (North East Down) est le repère de représentation des équations de navigation. C'est un repère orthogonal, son origine est située au centre de projection du centre de gravité du mobile. Les trois axes sont orientés vers le Nord, vers l'Est et vers la verticale descendante pour le repère NED (North East Down) et ascendant pour le repère ENU (East North Up) (Fig. 1.5).
- le système de coordonnées WGS-84 (World Geodetic System 1984) est largement utilisé dans la navigation basée sur GPS. C'est un système de référence (ECEF) terrestre qui modélise la surface de la Terre sous la forme d'un ellipsoïde.

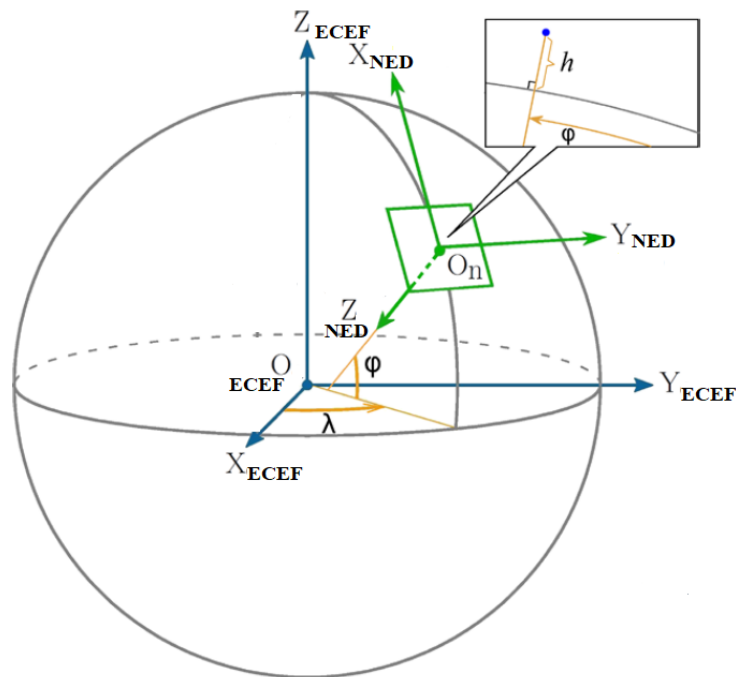


FIGURE 1.5 – Illustration des repères spatiaux utilisés pour les coordonnées issues du récepteur GPS : repère local NED (vert), référentiel ECEF (bleu) et coordonnées WGS-84 (orange) [30].

Les paramètres de l'ellipsoïde associé à ce système sont :

- $a$  : demi-grand axe,
- $b$  : demi-petit axe ( $b = 6356752,31424518$  m),
- $f$  : aplatissement ( $1/298,257222101$ ),
- $e$  : excentricité,

- $w_e$  : vitesse de rotation de la Terre ( $w_e=7,292115.10^{15}$  rad/s),
- $GM$  : constante gravitationnelle de la Terre ( $GM = 3.986004418.10^{14}m^3/s^2$ ),
- $c$  : vitesse de la lumière.

Les coordonnées géographiques expriment la position en termes de latitude, de longitude et hauteur comme suivant :

- la latitude ( $\varphi$ ) est l'angle formé entre le plan équatorial et le rayon de courbure normale de la Terre,
- la longitude ( $\lambda$ ) est l'angle formé entre le méridien de Greenwich et la projection du point d'intérêt sur un plan équatorial,
- l'altitude ellipsoïdale ( $h$ ) est la distance calculée le long de la normale entre le point d'intérêt et l'ellipsoïde de référence.

On peut passer des coordonnées cartésiennes  $(x, y, z)$  aux coordonnées géographiques  $(\varphi, \lambda, h)$  à l'aide des relations suivantes [59] (Eq . 1.12) :

$$\begin{aligned}\tan(\lambda) &= \frac{y}{x} \\ \tan(\varphi) &= \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} \left(1 - e^2 \frac{C}{C + h}\right)^{-1} \\ h &= \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\cos(\varphi)} - C\end{aligned}\tag{1.12}$$

avec  $C = \frac{a^2}{\sqrt{a^2 \cos^2(\varphi) + b^2 \sin^2(\varphi)}}$ .

### 1.1.1.2.2 Mise en équation

Pour calculer la position du récepteur à un instant donné, on prend les  $m$  signaux des satellites visibles. Celle-ci nécessite de connaître la position d'au moins quatre satellites et la mesure de la pseudo-distance entre la position du récepteur et celle de chaque satellite. Les signaux sont décodés et transformés en messages. L'un des message contient la position  $(x_{S_i}, y_{S_i}, z_{S_i})_{i=\{1, \dots, m\}}$  de son satellite.

Le système d'équations à résoudre s'écrit comme suit :

$$\begin{cases} P_R^{S_1} = \rho_R^{S_1} + cdt^r = \sqrt{(x_{S_1} - x)^2 + (y_{S_1} - y)^2 + (z_{S_1} - z)^2} + cdt^r \\ \vdots \\ P_R^{S_m} = \rho_R^{S_m} + cdt^r = \sqrt{(x_{S_m} - x)^2 + (y_{S_m} - y)^2 + (z_{S_m} - z)^2} + cdt^r \end{cases}\tag{1.13}$$

On peut ici négliger le retard  $dt^e$  du fait de sa très faible valeur. La forme vectorielle de l'équation 1.13 sera :

$$P = h(X)$$

où :

$$\begin{aligned} - X &= (x, y, z, dt^r)^T, \\ - P &= (P_R^{S_1}, \dots, P_R^{S_m}). \end{aligned}$$

Pour résoudre cette équation on utilise la méthode des moindres carrés présente dans la partie suivante.

### 1.1.1.2.3 Résolution par la méthode des moindres carrés

La méthode des moindres carrés est une méthode qui nous permet de déterminer les paramètres du modèle présents dans l'équation 1.13 qui dépend des variances des observations. C'est une méthode de résolution itérative qui s'effectue par linéarisation de la fonction  $h$  :

- une solution initiale  $\hat{X}_0$  estimée est fournie au système,
- le système est linéarisé autour de la solution estimée  $\hat{X}_j$  à l'instant  $j$ .

$$P = h(\hat{X}_j) + H_j dX_j$$

avec :

- $H_j$  la matrice jacobienne :

$$H_j = \frac{\partial h(\hat{X}_j)}{\partial X} = \begin{bmatrix} \frac{x_{S_1} - x}{\rho_R^{S_1}} & \frac{y_{S_1} - y}{\rho_R^{S_1}} & \frac{z_{S_1} - z}{\rho_R^{S_1}} & c \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_{S_m} - x}{\rho_R^{S_m}} & \frac{y_{S_m} - y}{\rho_R^{S_m}} & \frac{z_{S_m} - z}{\rho_R^{S_m}} & c \end{bmatrix}$$

et  $dP_j = P - h(\hat{X}_j)$ , le système devient :

$$dP_j = H_j dX_j \quad (1.14)$$

-  $dX_j$  est estimé par moindres carrés à condition que  $[H_j^T \ H_j]$  soit inversible :

$$d\hat{X}_j = [H_j^T H_j]^{-1} H_j^T dP_j \quad (1.15)$$

La nouvelle solution estimée courante devient (Eq. 1.16) :

$$\hat{X}_{j+1} = \hat{X}_j + d\hat{X}_j \quad (1.16)$$

TABLE 1.1 – Principales sources d’erreurs du système GPS [78]

	Type d’erreurs	Erreurs (m)
<b>Satellite GPS</b>	Erreurs d’orbite	2
	Biais d’horloges	2
<b>Propagation</b>	Réfraction troposphérique	2,3 à 2,5
	Réfraction ionosphérique	2 à 10
	Multi-trajets (code)	0,5 à 1
	Multi-trajets (phase)	0,005 à 0,01
<b>Récepteur GPS</b>	Erreur d’horloge	1 à 1,5
	Centre de phase de l’antenne	0,01 à 0,02
	Bruit récepteur (code)	0,25-0,5
	Bruit récepteur (phase)	0,001 à 0,002

Le processus est répété jusqu’à convergence de la solution, ce qui est réalisé, en pratique, en quelques itérations.

### 1.1.1.3 Erreurs du système GPS

La précision du positionnement GPS est altérée par plusieurs types d’erreurs déterministes et aléatoires. Celles-ci sont liées soit à la constellation des satellites, soit à la traversée du signal émis dans l’atmosphère, ou alors au récepteur [68]. Le tableau 1.1 présente les principales sources d’erreurs du système GPS.

#### 1.1.1.3.1 Retards liés à l’ionosphère

L’ionosphère est une couche atmosphérique située entre 70 km et 1000 km au-dessus de la surface de la Terre. C’est un milieu dispersif pour les signaux. Dans cette région, les rayons ultraviolets du soleil ionisent une partie des molécules de gaz et libèrent des électrons. Ces électrons libres influent sur la propagation des ondes électromagnétiques. Ainsi, le signal GPS subit une perturbation en traversant cette couche. Cette perturbation se manifeste par un retard et conduit à une surestimation du temps de propagation du signal, et donc de la distance satellite-récepteur [75]. Ce retard dépend de la fréquence du signal. L’effet de l’ionosphère sur la mesure des distances aux satellites peut varier de 2 m à 10 m. Le retard ionosphérique pour les mesures de phase GPS est alors approché par l’équation 1.17 :

$$\Delta L_{ph}^{iono} = -\frac{a}{f^2}TEC \quad (1.17)$$

où :

- $a \approx 40.3m^3.s^{-2}$ ,
- $f$  la fréquence porteuse  $f_1$  ou  $f_2$ ,
- $TEC$  le nombre total d'électrons le long du trajet d'onde.

### 1.1.1.3.2 Retards liés à la troposphère

La troposphère est la plus basse couche de l'atmosphère qui s'élève jusqu'à environ 70 km au-dessus de la surface de la Terre. La teneur en vapeur d'eau de cette couche basse affecte la propagation des ondes GPS ayant des fréquences supérieures à 15 GHz [96]. Ce retard est en fonction de l'indice de réfraction troposphérique  $n$ , qui dépend de la température, de la pression et de l'humidité relative locales. Le retard troposphérique est divisé en deux termes : retard hydrostatique et retard humide. Le premier, retard hydrostatique, est de l'ordre de 2,3 m à 2,5 m au zénith et reste quasiment constant. Le second, retard humide, peut fluctuer de 5 cm à 80 cm au zénith.

De manière générale [36], le retard troposphérique ( $d_{tropo}$ ) se définit par l'équation 1.18 :

$$d_{tropo} = \int_{S^{tropo}} (n - 1)dS = 10^{-6} \int_{S^{tropo}} N dS \quad (1.18)$$

où :

- $\int_{S^{tropo}}$  est l'intégrale curviligne le long de la trajectoire  $S^{tropo}$  suivi par l'onde entre le satellite et le récepteur,
- $n$  l'indice de réfraction de l'air qui dépend des conditions météorologiques,
- $N$  vaut  $10^6(n - 1)$ .

### 1.1.1.3.3 Erreurs d'orbite

Ces erreurs sont connues par les erreurs d'éphémérides. Elles sont dues à l'erreur de positionnement du satellite et causent une mauvaise estimation des pseudo-distances [85]. En effet, les satellites sont soumis à des faibles mouvements qui modifient un peu la trajectoire de leur orbite. Les erreurs d'orbite sont calculées et transmises vers les satellites par les messages des stations de contrôle terrestres pour une retransmission à l'utilisateur. Ces erreurs induisent une erreur de l'ordre de 1 m à 6 m sur la mesure de la distance.

### 1.1.1.3.4 Erreurs d'horloges

Les satellites contiennent des horloges atomiques, très précises, qui contrôlent toutes les opérations de synchronisation embarquées, y compris la génération du signal de diffusion. Bien que ces horloges soient très stables, les champs de correction d'horloge dans le message de données de navigation sont dimensionnés de manière à ce que l'écart entre l'heure du satellite et l'heure GPS, qui ne puisse pas atteindre 1 ms. Un décalage de 1 ms correspond à une erreur de pseudo-distance de 300 km. Le système de contrôle détermine et transmet aux satellites les paramètres de correction de l'horloge pour les retransmettre dans le message de navigation.

Les horloges des récepteurs au sol ne sont pas aussi précises que celles des horloges à bord des satellites, ce qui introduit des erreurs de synchronisation entre récepteur et satellite [85]. Cela induit un décalage de plusieurs dizaines de kilomètres en quelques heures. Les erreurs d'horloge doivent être continuellement estimées et corrigées par des modèles mathématiques dans les équations de navigation. Ces erreurs sont corrigées à partir des paramètres spécifiques diffusés dans l'éphéméride du satellite. Elles induisent une erreur de l'ordre de 2 m sur la mesure de la distance. Pour éliminer les erreurs d'horloge, il suffit de faire la différence entre deux observations de deux satellites, reçues par un même récepteur et ainsi contenant la même erreur d'horloge.

#### 1.1.1.3.5 Multi-trajets

La source d'erreur la plus prépondérante dans les mesures GPS est le multi-trajets. Cette erreur est due à la réflexion du signal GPS sur des obstacles proches du récepteur, tel que les bâtiments, les arbres, un toit et ainsi de suite. Ceci induit à la réception de répliques réfléchies ou diffractées du signal souhaité. Elle varie considérablement en fonction de l'environnement dans lequel se trouve le récepteur et de l'angle d'élévation du satellite. Plus les satellites sont proches de la verticale au-dessus du récepteur plus les multi-trajets sont difficiles à se produire. Avec l'avance technologique, ce type d'erreur est minimisé alors qu'il peut atteindre 0.005 à 0.01 m sur la mesure de phase et de 0,5 à 1 m sur la mesure pseudo-distance [111].

#### 1.1.1.3.6 Bruits du récepteur

Le bruit du récepteur résulte des limitations de l'électronique du récepteur. Les sources dominantes des erreurs de mesure du récepteur sont les bruits thermiques et les effets de brouillage. Le signal provenant du satellite étant fortement faible, le récepteur amplifie le signal provenant du satellite, et aussi le bruit.

Le bruit de récepteur code C/A sera légèrement supérieur à celle du code P sachant que le signal du code C/A a une largeur de bande inférieure à celle du code P [68], le bruit du premier sera supérieur à celle du code P. Cette erreur peut atteindre 0,25 à 0,5 m pour le code C/A.

### 1.1.1.3.7 Centre de phase de l'antenne

Le signal est mesuré au centre de phase de l'antenne qui diffère en général de son centre physique. Le biais sur le signal reçu dépend de l'intensité, de l'angle d'élévation et de l'azimut. Il peut atteindre de 1 à 2 cm [32].

### 1.1.1.3.8 Géométrie des satellites

La répartition des satellites affecte la précision de positionnement du récepteur (Fig. 1.6). Si la constellation des satellites visibles est trop ramassée ou contrairement trop évasée cela peut produire un mauvais positionnement. Cette erreur est liée au facteur de qualité DOP (Dilution Of Precision).

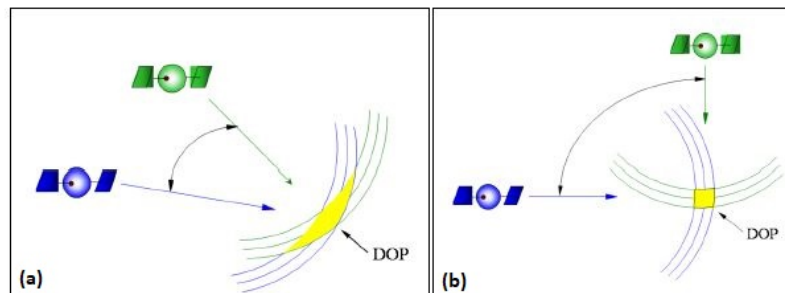


FIGURE 1.6 – Géométrie des satellites : (a) distribution non acceptable, (b) distribution acceptable [9].

Pour qualifier la géométrie des satellites visibles, il existe quatre indicateurs :

- le facteur HDOP (Horizontal DOP) pour le positionnement planimétrique,
- le facteur VDOP (Vertical DOP) pour le positionnement altimétrique,
- le facteur TDOP (Time DOP) pour la détermination du temps,
- le facteur PDOP (Position DOP) pour le positionnement 3D,
- Un 5ème facteur GDOP (Geometric DOP) intègre les facteurs PDOP et TDOP.

Pour calculer le facteur DOP, on utilise la matrice jacobienne calculée par la méthode des moindres carrés et exprimée dans le repère géodésique comme



suit :

$$(H^T H)^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_e^2 & \sigma_{e,n} & \sigma_{e,h} & \sigma_{e,dt} \\ \sigma_{n,e} & \sigma_n^2 & \sigma_{n,h} & \sigma_{n,dt} \\ \sigma_{h,e} & \sigma_{h,n} & \sigma_h^2 & \sigma_{h,dt} \\ \sigma_{dt,e} & \sigma_{dt,n} & \sigma_{dt,h} & \sigma_{dt}^2 \end{bmatrix}$$

Les 5 facteurs DOP sont aussi données comme suit, avec  $\sigma_0$  est la précision de la mesure :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{GDOP} = \frac{\sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_n^2 + \sigma_h^2 + \sigma_{dt}^2}}{\sigma_0} \\ \text{HDOP} = \frac{\sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_n^2}}{\sigma_0} \\ \text{PDOP} = \frac{\sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_n^2 + \sigma_h^2}}{\sigma_0} \\ \text{HDOP} = \frac{\sigma_h}{\sigma_0} \\ \text{TDOP} = \frac{\sigma_{dt}}{\sigma_0} \end{array} \right. \quad (1.19)$$

Dans le cas où plus de 4 satellites sont visibles, on peut utiliser le facteur DOP pour choisir les 4 satellites les mieux placés.

## 1.1.2 Amélioration des performances du système GPS

### 1.1.2.1 Système DGPS

Le système GPS différentiel (Differential Global Positioning System) est une technique de correction différentielle appliquée aux signaux GPS pour une meilleure performance. Ce système est composé d'une station de référence au sol (à un endroit parfaitement connu géographiquement), des récepteurs mobiles capables de recevoir les données de correction et de moyens de transmission de ces données [88]. Le système DGPS calcule la pseudo-distance de la station de référence et de celle du récepteur. Les différences de la position 3D sont transmises au récepteur. Ces corrections sont prises en considération soit dans la mesure des pseudo-distances, ou dans le calcul de la position pour corriger les erreurs de mesure du récepteur. Cette méthode est efficace à condition que les deux récepteurs

reçoivent des signaux du même satellite et ont le même type d'antenne. Ce système nécessite la correction de la pseudo-distance pour chaque satellite. D'autre part, les corrections dépendent également du temps, c'est-à-dire d'avoir besoin des mesures synchronisées. Dans le cas du DGPS, le récepteur est équipé d'un boîtier supplémentaire permettant de recevoir des corrections fournies par des stations DGPS fixes dont les positions sont connues avec une précision centimétrique. Cette correction peut être en temps réel ou en post-traitement [137].

Le but de ce type de correction différentielle est d'affiner la précision de localisation et minimiser certaines sources d'erreurs qui interviennent sur la position des satellites, la propagation dans l'atmosphère, les écarts d'horloges et le bruit du récepteur. Cette correction permet de passer à une erreur de l'ordre de 1 m.

### 1.1.2.2 Système EGNOS

Le système EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) est un projet commun entre l'Agence Spatiale Européenne, et l'Organisation Européenne pour la sécurité de la navigation aérienne (EUROCONTROL). La technique de correction européenne EGNOS est mise en place afin de répondre aux besoins de la communauté aéronautique, maritime et aux besoins du transport routier ou ferroviaire. Le service ouvert EGNOS est disponible depuis octobre 2009. Le système EGNOS actuel est composé de trois satellites géostationnaires, lancé avec succès en février 2005, et plusieurs stations au sol. Les satellites transmettent les messages de données sur les fréquences GPS L1 (1575,42 MHz) et L5. Avec EGNOS, un message d'intégrité prévient l'utilisateur dans un délai maximum de 6 secondes du dysfonctionnement éventuel de l'un des satellites en vue. Il permet d'améliorer le calcul de position pour passer d'environ 100 m à moins de 20 m en verticale et d'environ 20 m à 5 m en horizontal. Les données de positionnement EGNOS sont librement disponibles en Europe à toute personne équipée d'un récepteur GPS compatible EGNOS.

### 1.1.2.3 Système WAAS

En 2003, la FAA (Federal Aviation Administration) a déclaré le système WAAS (Wide Area Augmentation System) pour les opérations de vol aux États-Unis. C'est un système américain qui utilise la constellation GPS actuelle avec un réseau de 25 stations au sol et deux satellites géostationnaires. Ces deux satellites se trouvent l'un au-dessus du Pacifique et l'autre au-dessus de l'Atlantique ouest. Ces satellites retransmettent les corrections sur la fréquence L1=1575 MHz, identique à celle des satellites GPS. Ces corrections peuvent être utilisées par les récepteurs GPS pour améliorer la précision du positionnement (5 m environ au lieu de 15

m actuellement). Les performances du système WAAS sont suffisantes pour les instruments de pilotage et les nouveaux types d'approches à guidage vertical qui ne sont que légèrement moins performantes que les approches de haute précision.

### 1.1.3 Autres systèmes GNSS

#### 1.1.3.1 Système GLONASS

GLONASS (GLObal NAVigation Satellite System) est un système de positionnement par satellites d'origine soviétique. Il a été développé de 1982 à 2005 [4]. Il est composé de 24 satellites (21 opérationnels et 3 supplémentaires) répartis sur 3 orbites inclinées de  $64,8^\circ$  et a une altitude de 19130 km. La constellation de satellites GLONASS n'est pas différente de celle des satellites GPS mais elle améliore la probabilité d'avoir des satellites visibles dans les milieux urbains. Le système de coordonnées utilisé est le système PZ-90, très différent du WGS-84. Une étape primordiale de transformation de coordonnées est nécessaire pour calculer une position à partir des constellations GLONASS. Contrairement au GPS, qui transmet le format CDMA, GLONASS utilise l'accès multiple par répartition en fréquence (FDMA).

Chaque satellite transmet son signal de navigation sur une fréquence propre, ce qui améliore la résistance au brouillage. En 2000 et à cause de la chute de l'Union Soviétique, seuls 6 satellites étaient toujours opérationnels. Par la suite, les autorités ont décidé de lancer une nouvelle version de satellites GLONASS-M (M pour Modified) avec un système de coordonnées PZ-90.02 adaptés avec le WGS-84 [40].

#### 1.1.3.2 Système GALILEO

C'est un système européen de navigation initié en 1998 par l'Union Européenne et l'Agence Spatiale Européenne pour le besoin d'indépendance face au système américain GPS [3, 69]. Il sera composé de 30 satellites, 27 satellites actifs et trois de secours, distribués sur 3 orbites situées à 23229 km d'altitude avec une inclinaison de  $56^\circ$ , espacé de  $45^\circ$ . À partir de 2017, les activités des services Galileo étaient confiées à la GSA (The European GNSS Agency). La constellation nominale de 24 satellites actifs et de 6 satellites de réserve devrait être en place d'ici à 2020 [120]. La période d'un tour complet est d'environ 14 heures. La composante terrestre comprend deux centres de contrôles coordonnant un minimum de 20 autres au sol. De plus, GALILEO diffusera 10 signaux sur 3 bandes de fréquences : 6 signaux dédiés aux services gratuits, 2 signaux pour les services commerciaux et 2 pour le service public réglementé. Les 3 bandes sont : bande E5 entre 1164 MHz et 1215 MHz, bande E6 entre 1260 MHz et 1300 MHz, bande E2-L1-E1 entre 1559 MHz et 1592 MHz (Fig. 1.7). Les services sont détaillés ci-dessous [20] :

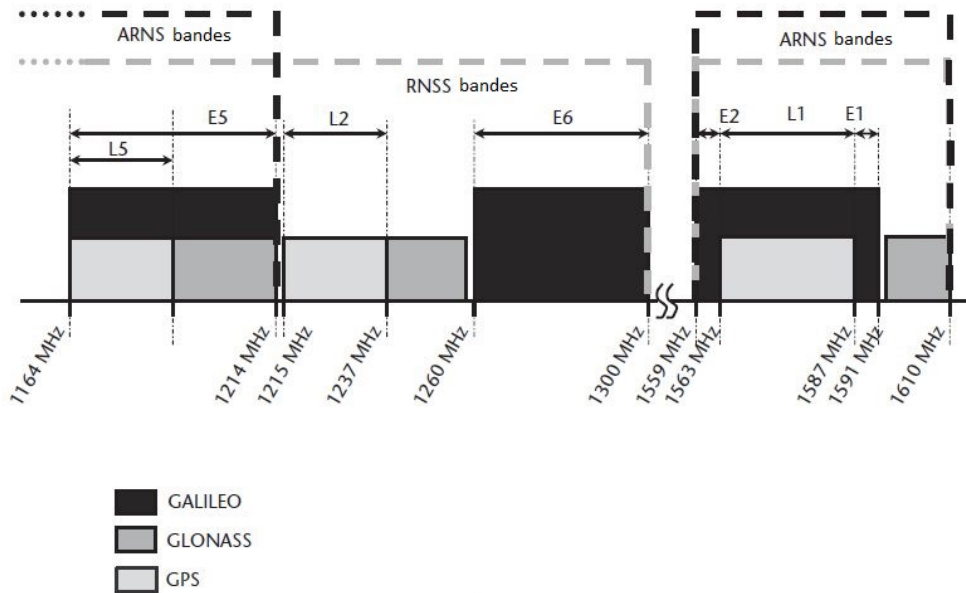


FIGURE 1.7 – Bandes de fréquence du système GALILEO [68].

- le service ouvert (Open Service) fournit des informations de positionnement et de synchronisation dans le monde entier au moyen de signaux de mesure et de données diffusés par la constellation GALILEO. Il est accessible gratuitement à tout utilisateur équipé d'un récepteur de navigation compatible avec le système GALILEO. Le système fournit des signaux dans la bande E1 et la bande E5 qui est ensuite divisée en deux bandes adjacentes, les bandes E5a et E5b, avec des fréquences centrales respectives de 1176,45MHz et 1207,14 MHz. Ces signaux seront comparables au service offert par les signaux civils ouverts du système GPS L1 et L2.
- le service commercial (Commercial Service) destiné à fournir des données avec une "valeur ajoutée" par rapport au service ouvert. Il est utilisé pour les applications professionnelles qui ont besoin du positionnement à haute précision. Des accords existent entre la société d'exploitation GALILEO et des fournisseurs de services pour avoir des services à valeur ajoutée telle que des alertes météorologiques, des avertissements d'accident, des informations sur la circulation et des mises à jour de cartes. Il fournit les signaux dans la bande E6.
- le service public réglementé (Public Regulation Service) est proposé pour les missions spécifiques qui nécessitent des performances ac-

crués. L'accès au PRS sera limité aux utilisateurs autorisés par le gouvernement, pour les applications sensibles. Le PRS ne sera accessible que par l'intermédiaire de destinataires équipés d'un module de sécurité PRS chargé d'une clé de déchiffrement PRS valide. Il sera fourni dans les bandes E1 et E6.

- le service de recherche et secours (Search And Rescue Service) est destiné à la localisation des balises de détresse, pour les opérations de recherche et de sauvetage. Il est utilisé dans le programme Cospas-Sarsat.
- en plus de ce qui précède, GALILEO offre un service de sauvegarde de la vie (Safety Of Live). Ce service identifie les signaux satellites reçus pour assurer qu'ils sont réellement diffusés par GALILEO. Il contient aussi un système de surveillance de l'intégrité et de notifications, c'est-à-dire qu'il est envoyé une alerte aux utilisateurs lorsque la qualité du signal utilisé ne garantit pas les spécifications du service SOL.

### 1.1.3.3 Système Beidou

Beidou est le nom chinois du programme de navigation par satellites conçu pour fournir un positionnement aux utilisateurs militaires et civils chinois. La Chine a essayé de créer son propre système régional de navigation. Le 15 décembre 2003, le système Beidou-1 (ou Beidou Navigation System : la Grande Ourse en Chinois) de première génération a été mis en service avec succès, faisant de la Chine l'un des trois pays possédant son système de navigation par satellites [61]. Il est composé de 35 satellites, 27 satellites répartis sur les orbites moyennes, 5 satellites sur des orbites géostationnaires et 3 satellites sur des orbites géosynchrones, inclinés de 55°. En 2006, la Chine a officiellement annoncé le développement de deuxième génération, y compris la constellation de satellites MEO-Beidou-2. Ce système est actuellement dans une phase semi-opérationnelle, et permet de déterminer la position uniquement en Chine et il devrait devenir complètement opérationnel en 2020.

## 1.2 Navigation à l'estime

Récemment, le développement et l'utilisation généralisée du GPS ont renforcé le rôle des capteurs de navigation inertielle qui sont capables de fournir des réponses rapides et peu coûteuses aux questions de base de la navigation en absence du GPS. La localisation à l'estime, dite localisation relative, est basée sur les

capteurs proprioceptifs qui informent sur l'état du véhicule. Ils déterminent les paramètres de la navigation comme la distance parcourue, la vitesse de déplacement, l'accélération et le cap d'un mobile, partant d'une configuration initiale connue. Les mesures des capteurs sont intégrées pour estimer la position et la vitesse courante du mobile. Les capteurs inertiels sont aussi utilisés pour la stabilisation et le contrôle du système. En fait, le GPS fournit une solution de localisation absolue et uniquement dans le cas de visibilité des satellites. Pour pallier les limites du GPS, un système de navigation à l'estime peut être rajouté au système de positionnement absolu GPS. Ce système combiné fournit une solution de localisation relative lorsque la visibilité satellitaire n'est pas suffisante et augmente la fiabilité du système de navigation. Ces techniques reposent sur l'utilisation des capteurs inertiels comme l'accéléromètre et le gyromètre, ainsi que l'odomètre. Il existe différentes méthodes de localisation, mettant en œuvre des processus de fusion d'informations, qui dépendent du nombre de capteurs nécessaires et de leur disposition sur le véhicule [128]. Nous nous intéressons dans notre travail à la localisation inertielle basée sur les gyroscopes et les accéléromètres. Nous présentons dans cette section les différents types des capteurs proprioceptifs comme l'odomètre, l'accéléromètre, le gyromètre et leurs erreurs inhérentes. Enfin, nous présentons l'intégration, par couplage lâche [8, 15] ou serré, des systèmes GPS/INS.

### 1.2.1 Odométrie

L'odométrie est une méthode qui fournit des informations de positionnement relatif. Il s'agit d'un système autonome complémentaire au système GPS. Il fournit une source de mesures en cas d'absence totale ou partielle de mesures GPS.

La localisation basée sur l'odométrie (Dead Reckoning en anglais) consiste à utiliser les rotations des roues du véhicule pour déterminer la vitesse du véhicule dans le plan [24, 23]. L'odomètre est généralement composé de codeurs incrémentaux qui mesurent le nombre de tours effectué par chaque roue par unité de temps. La précision des mesures dépend en particulier de la résolution des codeurs. De plus, à partir de la différence de distance parcourue par les roues droite et gauche, l'odométrie différentielle permet d'obtenir une information sur l'orientation du mobile. La détermination des informations de déplacement nécessite la connaissance des paramètres suivants : le diamètre des roues et leur entraxe, la structure cinématique et mécanique du véhicule ainsi que les propriétés mécaniques de contact entre les roues et la route. Le principe de fonctionnement de l'odomètre consiste à déterminer les paramètres de déplacement élémentaires  $\Delta D_d$  et  $\Delta D_g$  pour les deux roues droite et gauche pendant une période d'échantillonnage  $\Delta t$  connue :

$$\begin{cases} \Delta D_d = R_d \Delta \alpha_d \\ \Delta D_g = R_g \Delta \alpha_g \end{cases} \quad (1.20)$$

où :

- $R_d$  et  $R_g$  sont les rayons des roues droite et gauche respectivement (Fig. 1.8),
- $\Delta \alpha_d$  et  $\Delta \alpha_g$  sont les rotations élémentaires des roues droite et gauche.

Le déplacement  $\Delta D$  et la rotation élémentaire  $\Delta \theta$  effectuées par le véhicule sont calculé comme suit :

$$\begin{cases} \Delta D = \frac{\Delta D_d + \Delta D_g}{2} \\ \Delta \theta = \frac{\Delta D_d - \Delta D_g}{e} \end{cases} \quad (1.21)$$

où  $e$  correspond à la distance entre les deux points de contact des roues au sol nommée entraxe (Fig. 1.8).

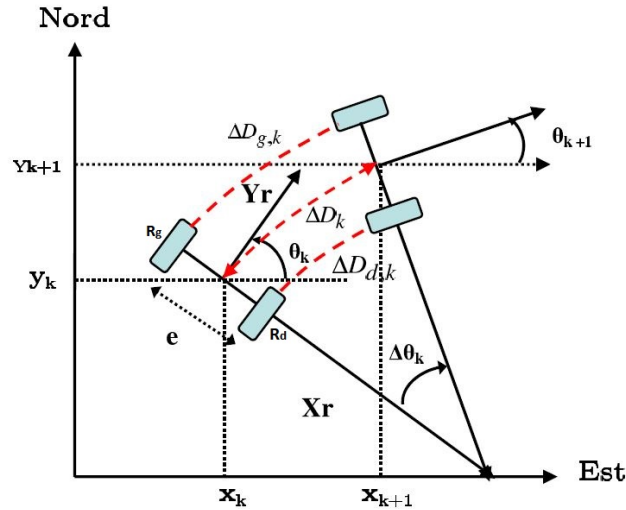


FIGURE 1.8 – Localisation basée sur l'odométrie.

Le déplacement du véhicule d'un instant  $t$  à un instant  $t + 1$  pendant un temps  $\Delta t$  est donné par :

$$\begin{cases} x_{t+1} = x_t + \Delta D_t \cdot \cos(\theta_t + \frac{\Delta \theta_t}{2}) \\ y_{t+1} = y_t + \Delta D_t \cdot \sin(\theta_t + \frac{\Delta \theta_t}{2}) \\ \theta_{t+1} = \theta_t + \Delta \theta_t \end{cases} \quad (1.22)$$

où :

- $(x_t, y_t)$  et  $(x_{t+1}, y_{t+1})$  sont les positions à l’instant  $t$  et  $t + 1$  respectivement,
- $\theta_t$  et  $\theta_{t+1}$  sont les orientations du véhicule à l’instant  $t$  et  $t + 1$  respectivement.

L’odométrie présente l’avantage de la simplicité et le faible coût de mise en œuvre, ainsi que sa fréquence d’échantillonnage et sa précision à court terme. Effectivement, l’odométrie affiche une dérive à cause des erreurs dues soit à la géométrie du véhicule (erreurs systématiques, comme le diamètre de roues), soit à la nature de la surface de contact entre la roue et le sol (erreurs non systématiques, comme le patinage et le glissement des roues) [130].

### 1.2.1.1 Erreurs d’odométrie

Comme tout capteur de navigation à l’estime, une des faiblesses de l’odométrie est la dérive de l’erreur de localisation qui croît proportionnellement à la distance parcourue par le véhicule. D’un point de vue général, les erreurs d’odomètre peuvent être liées à un dysfonctionnement du capteur (erreurs systématiques) ou à la dynamique du véhicule (erreurs non systématiques).

#### 1.2.1.1.1 Erreurs systématiques

Outre le bruit thermique des capteurs, les erreurs systématiques sont dues à une mauvaise connaissance des paramètres mécaniques du véhicule comme, par exemple la différence des diamètres de roues, le mauvais alignement des axes des roues ou le changement du diamètre d’une roue en raison de la température ou de la pression. Ces erreurs se cumulent proportionnellement à la distance parcourue. Toutefois, elles peuvent être quantifiées et corrigées par la suite en utilisant des procédures de calibration [25].

#### 1.2.1.1.2 Erreurs non systématiques

Les erreurs non-systématiques peuvent être liées à différents phénomènes comme la nature du contact entre la surface de roulement et les roues, la qualité de la chaussée, le poids du véhicule ou l’usure des pneumatiques. On peut notamment se trouver confronté à la présence de trous, de bosses et d’objets inopinés sur la surface de roulement qui viendront inévitablement perturber la qualité de la mesure. Un freinage brusque pourra également induire un blocage des roues qui se traduira par une mesure d’absence de déplacement malgré la dynamique existante du véhicule. Inversement, un patinage des roues conduira à une mesure de déplacement bien que le véhicule soit immobile. Ces sources d’erreurs sont bien plus difficiles à prédire et à évaluer car elles sont multifactorielles par nature.



## 1.2.2 Systèmes inertiels

Un système de navigation inertielle (INS pour Inertial Navigation System en anglais), est un dispositif muni de gyromètres et d'accéléromètres (dans certains cas, de magnétomètres) montés selon trois axes orthogonaux (Fig. 1.9) [51]. D'une manière générale, un système inertielle est composé de deux principaux éléments : une centrale inertielle (Inertial Measurement Unit en anglais) et une unité de calcul afin d'assurer l'estimation des paramètres utiles à la navigation. La centrale mesure les vitesses angulaires et les accélérations du mobile selon chaque axe du trièdre inertielle ( $X^I, Y^I, Z^I$ ) à une fréquence d'échantillonnage assez élevée. La navigation à l'estime repose dans ce cas sur une intégration des vitesses angulaires et des accélérations pour obtenir les attitudes et vitesses, et par conséquent la position du véhicule. Les capteurs inertiels sont utilisés dans de nombreux domaines comme particulièrement celui de la navigation en milieu aérien, maritime et terrestre.

Il existe deux types de centrales qui se distinguent par la façon dont la plate-forme supportant les capteurs est orientée vis-à-vis du boîtier : les centrales à plate-forme stabilisée et celles à plate-forme liée. La plate-forme stabilisée est isolée de tout mouvement de rotation externe et la mesure se fait dans un référentiel connu tout en pouvant intégrer directement les données. Par contre, les capteurs à plate-forme liées (Strapdown en anglais) sont montés rigidement sur le véhicule, ce qui fait que les mesures sont lues dans le repère du véhicule et implique une projection des mesures dans un repère fixe avant l'intégration.

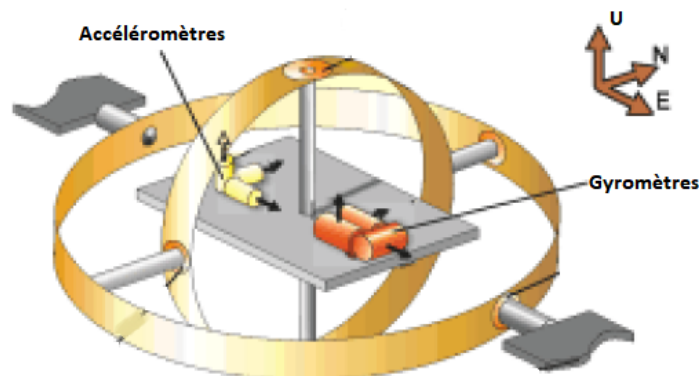


FIGURE 1.9 – Centrale inertielle stabilisée [74].

Les capteurs inertiels ne sont pas affectés par l’environnement dans lequel ils évoluent et offrent donc une alternative idéale aux récepteurs GNSS lors de conditions difficiles de mesures. La précision des capteurs inertiels est bonne pour des durées courtes [94, 118]. Cependant, selon la qualité du système, les capteurs inertiels sont mal adaptés à une localisation sur une longue période temporelle car ces systèmes déterminent la trajectoire par intégration. Partant des lois de la mécanique de Newton, et des mesures de vitesse angulaire  $\omega$  et d’accélération  $a$ , on obtient les paramètres (position, vitesse, orientation) du véhicule par intégration temporelle (Eq. 1.23) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Vitesse :} \quad v = \int a dt \\ \text{Position :} \quad X = \int v dt \\ \text{Orientation :} \quad \psi = \int \omega dt \end{array} \right. \quad (1.23)$$

### 1.2.2.1 Accéléromètres

Un accéléromètre est un capteur qui mesure l’accélération en un point donné, selon trois axes orthogonaux dans un repère inertiel. Plus précisément, l’accéléromètre mesure la force spécifique  $a$  qui comprend l’accélération cinématique du véhicule combinée à l’accélération liée à l’effet gravitationnel de la Terre. En principe, un accéléromètre peut être modélisé comme un dipôle masse-ressort attaché à une structure fixe. Selon les équations de Newton, le déplacement de la masse sera proportionnel à l’accélération qu’elle subit. L’accéléromètre mesurera donc l’accélération dans le repère inertiel lié au système de mesure. Dans le cas d’une navigation à l’estime, une double intégration des accélérations permet en particulier de calculer le déplacement du véhicule. Cependant, cette double intégration induit des accumulations d’erreurs et une dérive temporelle de l’erreur (« drift » en anglais).

Principalement, les accéléromètres sont classés en deux groupes : les accéléromètres purement mécaniques et les accéléromètres MEMS/MOEMS (sigle de l’anglais Micro-Electro-Mechanical/Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems). Les accéléromètres MEMS reposent sur l’utilisation de petits pendules en silicium qui permettent de mesurer l’accélération grâce à l’effet des forces électrostatiques. Les MEMS constituent actuellement un domaine de recherche et développement actif chez les fabricants. La figure 1.10 représente les performances de différents types d’accéléromètre.

Les mesures sont affectées par des erreurs qui varient avec le temps. Elles sont principalement liées à la température, au bruit du système, à la qualité du capteur et à la technologie utilisée. L’accélération dépend de la deuxième loi de Newton, l’équation 1.24 donne le modèle général de la sortie d’un accéléromètre

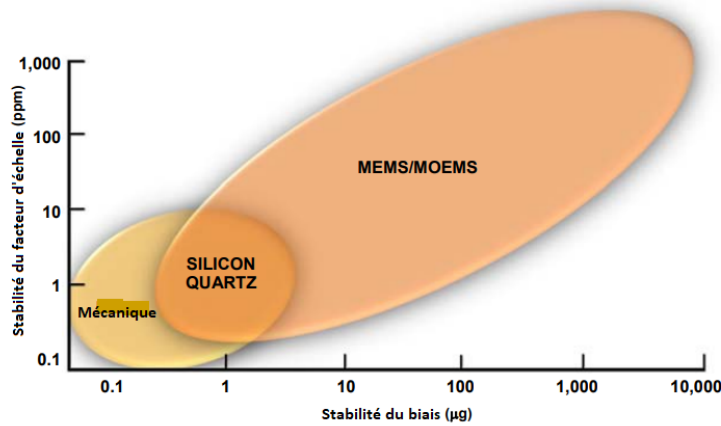


FIGURE 1.10 – Performances des différents types d'accéléromètre [113].

[118] :

$$a_{\text{sortie}} \approx (1 + s_a)a + b_a + \eta_a \quad (1.24)$$

où :

- $a_{\text{sortie}}$  est la sortie de l'accéléromètre en  $m/s^2$ ,
- $s_a$  est le facteur d'échelle qui affecte la vraie accélération,
- $a$  la vraie accélération mesurée par le capteur en  $m/s^2$ ,
- $b_a$  est le terme de biais influençant la mesure de l'accéléromètre,
- $\eta_a$  est le bruit de l'accéléromètre.

On peut utiliser les accéléromètres dans de nombreux domaines comme la surveillance de la sûreté des structures, comme détecteurs d'inclinaison, de vibrations et de choc, pour le nivelage numérique, etc. On trouve les détails au sujet de divers principes d'accéléromètres dans [130].

### 1.2.2.2 Gyromètres

Le gyromètre est un capteur proprioceptif qui permet de mesurer la vitesse angulaire  $\omega$ . A partir du montage de gyromètres selon trois axes orthogonaux on peut mesurer la vitesse angulaire 3D et déduire l'orientation du mobile dans l'espace. Ces capteurs sont très utilisés dans le domaine de la robotique mobile car ils peuvent compléter les capteurs de navigation à l'estime de type odomètre et aider à la localisation précise du mobile. Le modèle général d'une mesure est présenté dans l'équation suivante :

$$\omega_{\text{sortie}} \approx (1 + s_\omega)\omega + b_\omega + \eta_\omega \quad (1.25)$$

avec :

- $\omega_{\text{sortie}}$  : vitesse angulaire en sortie en  $\text{rad/s}$ ,
- $s_\omega$  : facteur d'échelle affectant la vitesse de rotation,
- $\omega$  : vraie vitesse angulaire mesurée par le capteur en  $\text{rad/s}$ ,
- $b_\omega$  : terme caractérisant le biais,
- $\eta_\omega$  : bruit estimé du gyromètre.

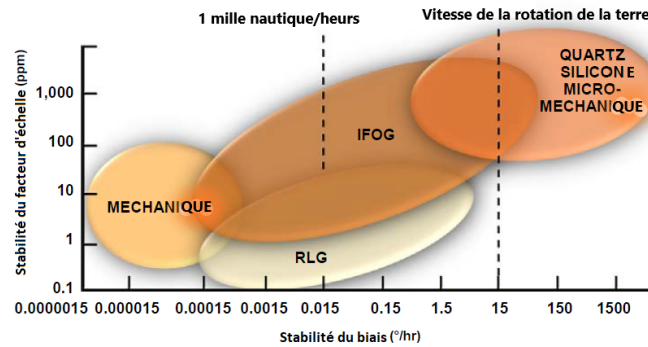


FIGURE 1.11 – Performances des différents types de gyromètres [113]

Les paramètres principaux qui caractérisent un gyromètre sont la résolution, le biais et le facteur d'échelle (Fig. 1.11). On distingue parfois le gyromètre et le gyroscope qui est un capteur de position angulaire sachant qu'un même système peut fonctionner en gyroscope ou gyromètre. Il existe deux groupes des gyroscopes sur le marché : les gyroscopes mécaniques/électromécaniques (MEMS, depuis les années 1990) et les gyroscopes optiques comme les RLG (Ring Laser Gyro) depuis 1970, les FOG (Fiber Optic Gyros) depuis 1980 [71]. La figure 1.12 montre la complexité technologiques (en termes de nombre d'éléments) de chaque type de gyroscope.

### 1.2.2.2.1 Gyroscopes mécaniques

Les gyroscopes mécaniques sont le type le plus courant. Leur principe de fonctionnement est basé sur une toupie en rotation dont l'extrémité est solidaire d'un boîtier soumis au mouvement du véhicule. Le gyromètre utilise plusieurs éléments vibrants qui produisent des signaux sinusoïdaux identiques et d'amplitude constante lorsqu'ils est au repos. Lorsqu'il est soumis à un mouvement de rotation, cette rotation crée une force perpendiculaire au mouvement appelée force de Coriolis qui induit une variation de l'amplitude des signaux. Cette force est

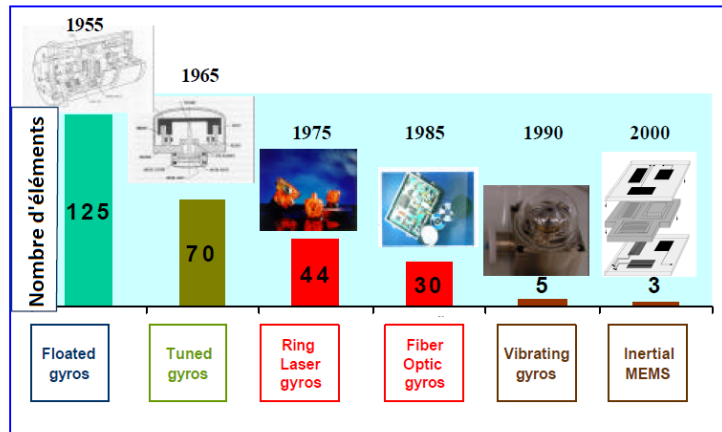


FIGURE 1.12 – Complexité de chaque famille de gyroscopes [113]

proportionnelle à la vitesse angulaire de rotation du corps. En règle générale, les gyroscopes mécaniques présentent une excellente précision mais ont un coût élevé.

#### 1.2.2.2.2 Gyroscopes optiques

Les gyroscopes optiques présentent des évolutions importantes en termes de fiabilité et de précision particulièrement depuis une dizaine d'années. Ils constituent des capteurs à composants liés basés sur l'émission de deux faisceaux lumineux dans des directions opposées. Si le capteur subit une rotation alors le faisceau qui le parcourt dans le sens de cette rotation aura un décalage temporel, dû à l'effet Sagnac, différent de celui du faisceau voyageant dans le sens de la contre-rotation. En mesurant l'écart temporel entre ces deux signaux, on peut déduire la vitesse angulaire [19]. Il existe plusieurs types de gyroscopes optiques comme les gyroscopes laser en anneau et les gyroscopes à fibres optiques. L'avantage du gyroscope laser en anneau (RLG) est qu'il ne contient aucun élément mobile. Le type RLG est basé sur l'émission de faisceaux lumineux dans un gaz faible pression à l'intérieur d'une cavité optique. Le gyroscope à fibre optique (FOG) fonctionne sur le même principe que les RLG. Ils ont initialement été développés comme solution de remplacement moins coûteuse. Le type FOG est basé sur l'émission de faisceau laser dans un enroulement de fibre optique. Les gyroscopes optiques sont utilisés dans le domaine aérien et spatial ainsi que dans des applications militaires en raison de leur excellente stabilité et linéarité du facteur d'échelle.

#### 1.2.2.2.3 Gyroscopes MEMS

Concernant les gyroscopes MEMS, il est plus difficile d'atteindre des performances similaires aux performances des accéléromètres MEMS [18]. Ce type de gyroscope est également basé sur la force de Coriolis pour déterminer la vitesse angulaire. Il existe actuellement plusieurs types de gyroscopes MEMS. On peut citer dans la littérature les gyroscopes à diapason (Vibrating Beam ou Tuning Fork) et les gyroscopes à toupie vibrante (Vibrating Wheel). Les gyroscopes à diapason contiennent une paire de masses qui sont amenées à osciller avec une amplitude égale mais dans des directions opposées. Dans Les gyroscopes à toupie vibrante, la roue vibre autour de son axe de symétrie et la rotation autour de l'un ou l'autre des axes dans le plan entraîne l'inclinaison de la roue, ce qui peut être détecté à l'aide d'électrodes capacitatives situées sous la roue. Ces gyroscopes présentent une stabilité et linéarité moyenne du facteur d'échelle mais ont un coût acceptable.

### 1.2.2.3 Erreurs du système inertiel

Comme tout capteur, il existe des sources d'erreurs à prendre en considération dans les systèmes de navigation inertielle pour modéliser les vitesses angulaires et accélérations [121]. Les trois principales erreurs sont le biais, le bruit thermique et le facteur d'échelle comme illustrés sur la figure 1.13.

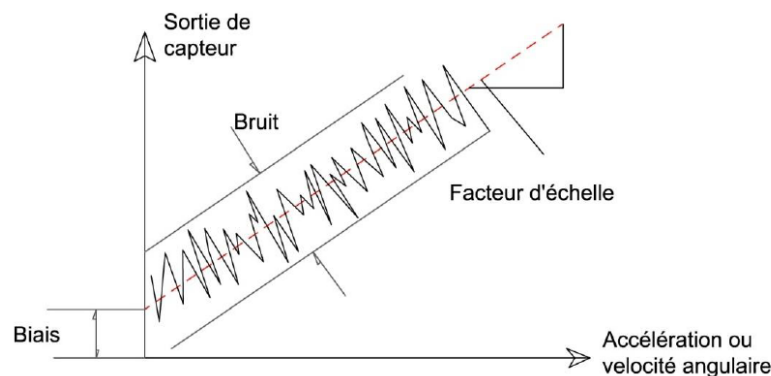


FIGURE 1.13 – Erreurs liées aux capteurs inertiels [9]

#### 1.2.2.3.1 Biais

Le biais est l'erreur la plus directe : il s'agit d'une erreur additionnelle. Dans le cas du gyromètre, il est mesuré en deg/s. Pour l'accéléromètre, lorsque le biais constant  $\epsilon$  est doublement intégré, il conduit à une erreur de positionnement

qui augmente de manière quadratique avec le temps (Eq. 1.26) où  $t$  est le temps d'intégration.

$$b_a = \epsilon \frac{t^2}{2} \quad (1.26)$$

Pour le gyroscope, le biais cause une erreur angulaire qui croît linéairement avec le temps (Eq. 1.27) :

$$b_\omega = \epsilon t \quad (1.27)$$

Il est possible d'estimer le biais en calculant une moyenne de la sortie lorsque le système ne subit aucun mouvement et ensuite de le compenser par simple soustraction.

### 1.2.2.3.2 Facteur d'échelle

Les erreurs de facteur d'échelle sont dues aux erreurs d'alignement et de fabrication ou au vieillissement du capteur. C'est une proportion entre les vitesses angulaires entrantes et celles sortantes. Il est mesuré en v/deg/s qui transforme la vitesse angulaire en tension. Le facteur d'échelle dépend de la température et du temps. En conséquence, il peut-être calibré une fois pour toute dans la plupart des cas.

$$\omega_{\text{sortie}} = s_\omega \omega_{\text{entrée}} \quad (1.28)$$

$$a_{\text{sortie}} = s_a a_{\text{entrée}} \quad (1.29)$$

avec  $s_{\omega,a}$ , le facteur d'échelle du gyroscope ou de l'accéléromètre.

### 1.2.2.3.3 Bruit thermique

De manière classique, les mesures sont perturbées par le bruit thermique lié aux dispositifs électroniques. Il correspond à un signal aléatoire qu'il est difficile de supprimer de manière systématique. Pour le gyroscope, l'effet de ce bruit est modélisé par une marche aléatoire dont l'écart-type croît proportionnellement à la racine carrée du temps d'intégration (Eq. 1.30).

$$\eta_\omega = \sigma \sqrt{t \Delta_t} \quad (1.30)$$

Pour l'accéléromètre, l'erreur peut être modélisée par un bruit blanc de moyenne nulle et d'écart-type proportionnel à  $t^{3/2}$  (Eq. 1.31).

$$\eta_a \approx \sigma t^{3/2} \sqrt{\frac{\Delta t}{3}} \quad (1.31)$$

Le tableau 1.2 présente un résumé des différentes erreurs.

TABLE 1.2 – Tableau des différentes erreurs des capteurs inertiels [88]

Type d'erreurs	Description	Résultats de l'intégration	
		Accéléromètre	Gyromètre
<b>Biais</b>	Biais constant	Erreur du position croît de manière quadratique $b_a = \epsilon \frac{t^2}{2}$	Erreur angulaire en constante croissance $b_\omega = \epsilon t$
<b>Facteur d'échelle</b>	Erreur déterministe	$a_{\text{sortie}} = s_a a_{\text{entrée}}$	$\omega_{\text{sortie}} = s_\omega \omega_{\text{entrée}}$
<b>Bruit thermique</b>	Variance $\sigma$	Ecart-type de l'erreur de positionnement $\eta_a \approx \sigma t^{3/2} \sqrt{\frac{\Delta t}{3}}$	Angle avec une marche aléatoire d'écart-type $\eta_\omega = \sigma \sqrt{t \Delta t}$

### 1.2.3 Système de navigation hybrides GPS/INS

Une absence ou une erreur de positionnement d'un mobile à l'aide du GPS peut être dû soit aux masquages dans des zones urbaines, soit aux effets de multi-trajets, de perturbations atmosphériques et/ou d'erreurs d'horloge de satellite. Pour améliorer ou compléter le système GPS, des capteurs inertiels peuvent être couplés au système GPS. Les avantages et les inconvénients du fonctionnement des systèmes GPS et INS indépendamment sont présents dans le tableau 1.3. Ainsi, il devient possible de corriger périodiquement les erreurs GPS à l'aide de mesures externes telles que celles provenant d'un système inertiel. La centrale inertielle fournit les informations de navigation en particulier lorsque le signal GPS n'est pas disponible. L'utilisation de ces systèmes hybrides est connue depuis longtemps et bien détaillée dans la littérature. Les avantages de l'intégration GPS/INS sont perceptibles à différents niveaux autant pour l'acquisition de signaux GPS de faible intensité que pour la poursuite de ces derniers en environnement difficile [43].

Deux architectures d'intégration des systèmes GPS/INS peuvent être réalisées : le couplage lâche et le couplage serré.

#### 1.2.3.1 Intégration par couplage lâche

L'intégration par couplage lâche offre une solution robuste à la navigation. La particularité de cette configuration est l'utilisation d'un estimateur séparé



TABLE 1.3 – Tableau comparatif entre les systèmes GPS et INS autonomes

	Avantages	Inconvénients
<b>GPS autonome</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erreurs restreintes</li> <li>- Repère attaché à l'environnement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Taux d'échantillonnage faible</li> <li>- Sensibilité au bruit</li> <li>- Absence d'information sur l'attitude</li> </ul>
<b>INS autonome</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Taux d'échantillonnage élevé</li> <li>- Entièrement autonome</li> <li>- Information sur la rotation et la translation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erreurs non bornées</li> <li>- Repère attaché à la position initiale du véhicule</li> <li>- Nécessite une connaissance de la valeur de la gravité</li> </ul>

pour gérer les données GPS. Il présente une architecture en boucle fermée qui permet la correction de certains paramètres d'erreurs du système INS. L'exemple de la figure 1.14 constitue une intégration en cascade grâce aux deux filtres (filtre GPS et filtre d'intégration) utilisés séquentiellement.

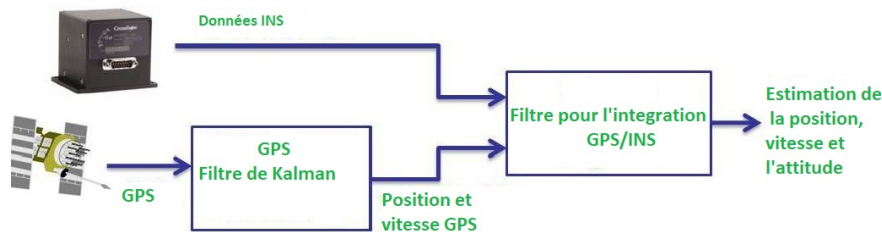


FIGURE 1.14 – Intégration GPS/INS par couplage lâche

### 1.2.3.2 Intégration par couplage serré

Par couplage serré, les données utilisées sont les observations GPS brutes, les pseudo-distances, ou encore les mesures Doppler. Dans ce cas, les mesures GPS et INS sont utilisées ensemble dans un filtre global GPS/INS, ce qui permet d'éliminer la nécessité d'avoir systématiquement quatre satellites en ligne de vue et de réduire l'erreur liée à la mise en cascade de différents filtres. Le schéma général de ce type d'approche est présenté à la figure 1.15. Une architecture cascadée est loin d'être optimale et peut rendre le système difficile à paramétrer et

ajuster [113] et [99]. L'inconvénient majeur du couplage serré par rapport au couplage lâche est la taille du vecteur d'état, ce qui entraîne une augmentation de la charge de calcul.

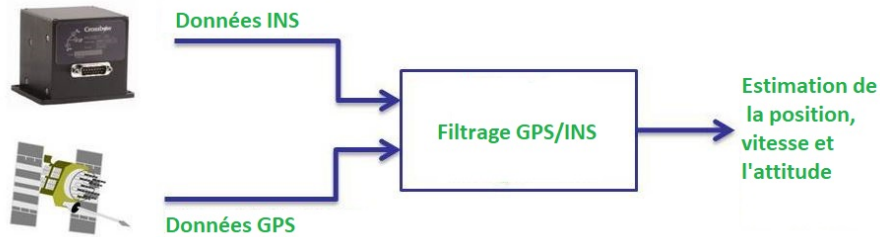


FIGURE 1.15 – Intégration GPS/INS par couplage serré

Un comparatif des deux types de couplage est présenté dans le tableau 1.4[113].

TABLE 1.4 – Les avantages des couplages lâches et serrés

	<b>Avantages</b>
<b>Couplage lâche</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Acquisition GPS plus rapide</li> <li>- Meilleur calibrage et alignement des instruments inertiels</li> <li>- Meilleure estimation de l'attitude</li> </ul>
<b>Couplage serré</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Meilleure performance de navigation</li> <li>- Meilleur calibrage de l'instrument</li> <li>- Suivi fiable sous haute dynamique</li> <li>- Bande passante réduite de la boucle de poursuite (résistance au brouillage)</li> <li>- Utilisation optimale des satellites disponibles</li> </ul>

### 1.3 Navigation à l'aide des cartes numériques

La carte numérique consiste à représenter les différentes topographies terrestres comme les terrains, les routes et les bâtiments par des représentations numériques. Ces données numériques sont généralement stockées dans des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) [80], comme MapInfo, GRASS GIS, etc. Il existe plusieurs types de cartes comme les réseaux routiers, les modèles

numériques de terrain et/ou d'élévations etc. La carte routière est une représentation schématique qui modélise les routes présentes dans une zone donnée, où chaque route est représentée par un ensemble de segments caractérisés par deux extrémités, dont on connaît la position. Des informations complémentaires sur le type de route, le sens de circulation, etc. sont également disponibles. Il existe deux types de cartes routières numériques : les cartes de navigation 2D et les cartes de navigation 3D.

Certaines applications nécessitent aussi les données d'élévation de terrain. Ce besoin conduit à la génération de Modèles Numérique de Terrain (MNT) qui est une représentation numérique des altitudes du terrain. Les hauteurs de tous les objets terrestres comme les bâtiments et la végétation sont aussi stockées dans un Modèle Numérique d'Élévation (MNE). Ces cartes numériques peuvent être utilisées en ligne ou hors ligne selon le type d'application.

Du fait des erreurs de mesures des systèmes de localisation basée sur le GPS et/ou INS, la mise en correspondance cartographique peut se révéler comme une étape nécessaire pour localiser plus précisément le véhicule au sol. Les algorithmes de mise en correspondance cartographique, communément appelées méthode de "map-matching", reposent sur la corrélation entre les informations obtenues par les systèmes de localisation utilisant des capteurs proprioceptifs et/ou extéroceptifs et celles de la base de données cartographiques. Les méthodes varient de celles utilisant des techniques de recherche simples à celles utilisant des techniques mathématiques plus complexes. Le map-matching est mis en œuvre dans le domaine du contrôle de la circulation, l'aménagement, la navigation [15], la détection d'événements, les jeux vidéo, etc.

Différents types de cartes routières numériques 2D/3D et de modèles numériques de terrain et d'élévations existent. Nous présenterons ces différents types et les méthodes associées pour la mise en correspondance cartographique.

### 1.3.1 Cartes routières numériques 2D

Les cartes routières 2D modélisent les routes par des segments bidimensionnels à deux nœuds, appelées "jonctions", caractérisés par leur position et leur direction au sol. La précision de la carte est liée au nombre de nœuds par segment [98]. Les cartes routières numériques constituent des bases de données très précieuses pour la planification d'itinéraires dans des applications de navigation, de guidage touristique, etc.

Les cartes de navigation les plus communément utilisées sont : Google Maps, Bing Maps de Microsoft, BD Carto de l'IGN (Institut Géographique National) et OpenStreetMap (OSM). Google et Bing Maps sont les cartes les plus

populaires dans les applications de navigation. OSM est la source cartographique gratuite la plus utilisée en Europe [34]. Il est rare de trouver des études comparatives de la précision et de la qualité de ces différentes données en raison de la difficulté d'accéder aux données vectorielles de Google et Bing Maps. IGN propose des cartes routières traditionnelles [31], idéales pour se déplacer à pied, en vélo, en voiture, etc. OSM fournit des cartes routières numériques 2D gratuites que les utilisateurs peuvent mettre à jour en téléchargeant leurs traces GPS [55, 21]. Il est possible de visualiser la localisation au sol des routes et compléter plusieurs paramètres comme le nom, le type, le sens de circulation, et l'inclinaison de la route.

Les méthodes de localisation sur carte (correspondance 2D) se divisent en deux groupes : les méthodes géométriques et les méthodes topologiques [106, 56]. Les méthodes géométriques sont plus simples et intuitives. Les méthodes topologiques sont les plus avancées et plus complexe.

### 1.3.1.1 Méthodes de localisation géométriques

Les méthodes géométriques sont des algorithmes basés sur la forme du segment de route. Elles utilisent uniquement les informations géométriques des cartes telles que la position 2D des nœuds. Trois types d'algorithmes géométriques sont présentés dans la littérature [114, 22, 105] : méthode point à point, méthode point à courbe et méthode courbe à courbe.

Ces méthodes bien qu'elles soient rapides et simples, ne sont pas fiables en cas des intersections et de parallélisme des routes. Leur précision est faible, allant de 80% à 85%.

#### 1.3.1.1.1 Méthode «point à point»

La méthode géométrique «point à point» est basée sur les critères métriques pour évaluer la distance entre deux points. Elle consiste à déterminer la distance entre la position estimée et les différents nœuds qui décrivent les segments routiers. Elle sélectionne le nœud le plus proche correspond aux coordonnées du véhicule [72]. La précision de cette méthode dépend de la résolution des points et des nœuds de la carte. Les résultats du positionnement dépendent ainsi donc de la façon dont la cartographie aura été réalisée.

#### 1.3.1.1.2 Méthode «point à segment»

La méthode «point à segment» consiste à déterminer la distance entre le point estimé GPS, et les différents segments de route, pour sélectionner le segment

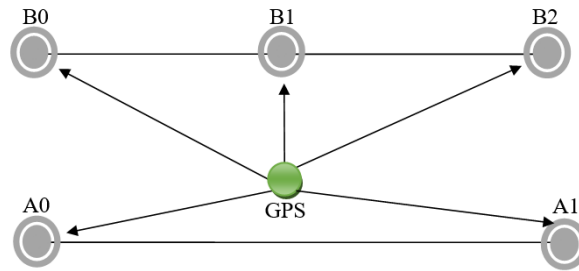


FIGURE 1.16 – Localisation «point à point»

le plus proche [119]. Pour le même exemple présenté dans la figure 1.16, le point GPS est associé au segment  $[A0 ; A1]$  dans ce cas au lieu du point B1.

### 1.3.1.1.3 Méthode «courbe à courbe»

La méthode «courbe à courbe» consiste à comparer un ensemble de points estimés à la carte, de sorte à corriger les lacunes des deux méthodes précédentes [136, 73, 125]. En effet, dans le cas de la série des points comme représentés

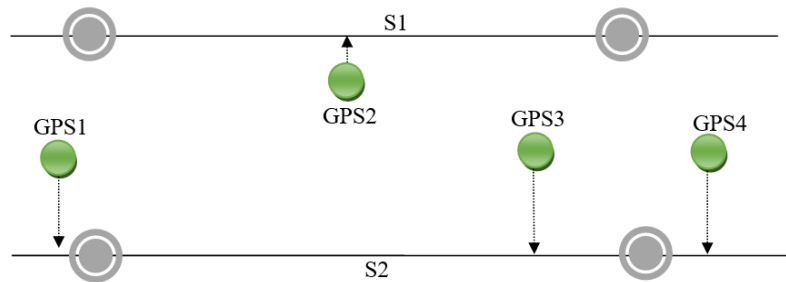


FIGURE 1.17 – Localisation «point à segment»

dans la figure 1.17, les trois points GPS1, GPS3 et GPS4 appartiennent au segment S2 et GPS2 au segment S1. Généralement, la méthode point à segment ne prend pas en considération la cohérence spatiale et temporelle des données. Elle garde en mémoire les positions précédentes et les considère comme un ensemble pour les mettre en correspondance avec la carte. La distance peut alors être définie comme la somme des distances entre chaque point et sa projection sur l'arc correspondant comme par exemple la distance de Fréchet [89, 33, 135].

### 1.3.1.2 Méthodes de localisation topologiques

Les méthodes de localisation topologiques utilisent des informations topologiques des rues telles que la connectivité de segments, les relevés des segments et les attributs des rues dans leur calcul [81]. Les performances des méthodes topologiques sont bien meilleures que celles des algorithmes géométriques et le taux de mise en correspondance peut se situer entre 80% et 96%. Elles sont encore améliorées par l'introduction des informations supplémentaires telles que la courbure des segments des rues, la distance perpendiculaire entre les candidats [132, 90, 103]. Ces méthodes nécessitent une position de référence initiale fiable du véhicule, dit «point d'appui».

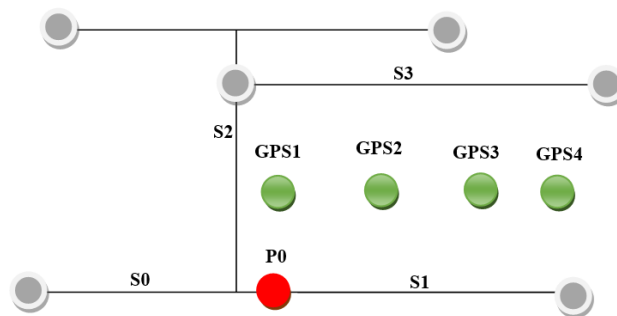


FIGURE 1.18 – Localisation topologique

Considérons par exemple le cas de la figure 1.18 : les méthodes géométriques auront tendance à attribuer la plupart des points GPS1 à GPS4 au segment S3. Mais si l'on considère que le véhicule se trouve initialement et avec certitude au point P0, alors il est matériellement impossible que les points aient pu rejoindre S3 compte tenu de la longueur de S2. Le véhicule est donc plus vraisemblablement en train de circuler sur le segment S1.

### 1.3.1.3 Autres méthodes de localisation

Dans certains cas de mise en correspondances cartographiques, les algorithmes géométriques ou topologiques n'aboutissent pas à une meilleure position sur la carte. Ces cas nécessitent des algorithmes plus sophistiqués. Il existe des méthodes de correspondance utilisant des techniques d'intelligence artificielle telles que les méthodes de pondération [81], comme par exemple celles basées sur la théorie de la croyance [45], celles utilisant la logique floue (Fuzzy Logic) [104, 108] et celles basées sur le calcul de la distance de Mahalanobis [86].

Les méthodes de pondération comprennent une étape de projection perpendiculaire de la position estimée sur les segments de routes et une étape de calcul du poids pour chaque candidat en fonction de la distance entre la mesure et le segment puis la sélection du meilleur segment. Les méthodes de pondération diffèrent dans la dernière étape sur la manière de sélectionner le meilleur candidat.

La plupart de ces algorithmes de mise en correspondance par carte sont conçus pour être utilisés avec des données de positionnement à haute fréquence d'acquisition. Ils utilisent les informations supplémentaires telles que la qualité des données de positionnement, l'erreur de cap et la vitesse du véhicule, le nombre de connexions par route et l'orientation du segment [135]. Par conséquent, les performances sont meilleures que celles des algorithmes géométriques et topologiques, mais ils sont plus complexes. En conséquence, ces méthodes montrent une amélioration du positionnement avec un accroissement inévitable du temps de calcul.

### 1.3.2 Modèles numériques de terrain

Les travaux des géologues sont à la base de la détermination des paramètres d'élévation et la forme topographique des terrains. Les MNT (Digital Terrain Model - DTM) permettent de passer d'un environnement bidimensionnel à un environnement tridimensionnel. La plupart des pays ont commencé à utiliser des techniques classiques de cartographie pour produire leurs propres cartes nationales avec des précisions variées. Cependant, on ne dispose pas d'un MNT pour toutes les zones de la Terre. Dans les années 1990, l'émergence des systèmes d'interférométrie radar ont permis la création de modèles numériques 3D efficaces. Ces systèmes radar utilisent des mesures de différence de phase entre deux images radar afin de déterminer la topographie du terrain. Mais, pour les surfaces lisses, telles les zones d'eau et les zones de sable, le signal radar risque de ne pas pouvoir aboutir à l'estimation de la mesure altimétrique.

Le MNT se rapporte à l'élévation du terrain lui-même et ne prend pas en compte la hauteur des bâtiments ni celles des arbres. Le MNE (Digital Elevation Model - DEM) prend en compte le relief, mais aussi ce qu'on appelle la "canopée" (sommets des arbres) ou encore le sur-sol (élévation des bâtiments). En 1993, les cartes Topo-DEM, dérivées des cartes topographiques numériques à l'échelle 1 :25000 (photographies aériennes à haute résolution) sont converties vers des MNE par photo-interprétation [122]. De nombreuses méthodes de représentation ont été proposées dans la littérature comme l'utilisation des triangles irréguliers (Triangulated Irregular Network - TIN) [100] et la triangulation de Delaunay [37].

Il existe plusieurs variantes de données MNE, les plus populaires étant celles ayant fait l'objet de missions spatiales : les données SRTM et ASTER GDEM sont disponibles gratuitement avec des précisions variées [126]. La qualité du MNE

dépend principalement de la précision des valeurs d'élévation, du nombre d'espaces vides et du nombre d'anomalies. Des travaux ont été publiés sur la pertinence et la précision de MNE par rapport aux altitudes GPS calibrées [35, 48, 62, 122]. Ces données sont stockées sous forme numérique et nécessitent des outils de visualisation spécifiques [110, 57].

Il existe d'autres modèles dotés de résolutions diverses (l'unité du maillage étant la seconde d'arc, soit environ 30,86 m) avec une couverture plus ou moins mondiale, qui sont disponibles publiquement depuis 1988. Ceux-ci s'étendent des produits à résolution de 5 minutes d'arc comme ETOPO5, TerrainBase, JGP95E [12] à ceux présentant une résolution de 30 secondes d'arc comme GTOPO30. GTOPO30 est un modèle numérique qui offre une couverture mondiale et des coordonnées de points d'élévation dans les référentiels WGS-84 et EGM-96. Plus récemment, des modèles basés sur la combinaison de plusieurs sources de données publiques, comme NEXTMap World 30 DSM [5], ont été mis à disposition. NEXTMap World 30 DSM est une combinaison entre trois types de données : celles d'une résolution d'1 seconde d'arc (ASTER GDEM2), de 3 secondes d'arc (SRTM) et de 30 secondes d'arc (GTOPO30). Un autre modèle, OSGB (Ordnance Survey of Great Britain), présente l'élévation dans le référentiel ODN [112]. La différence entre l'EGM-96 et l'ODN est faible, environ 80 cm au-dessus des îles britanniques.

### 1.3.2.1 Modèle SRTM

Une des sources de données MNE les plus utilisées est le modèle de données SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) produit à partir d'une mission spatiale mise au point par la NASA (National Aeronautics and Space Administration) et la NGA (National Geospatial-intelligence Agency). Ce projet consistait à créer une base de données publiques quasi-mondiale à haute résolution de la topographie de la Terre. En février 2000, la mission de 11 jours a été lancée afin d'obtenir un MNE, en utilisant deux bandes radar du capteur InSAR [109, 46] : la bande C (5,6 cm) et la bande X (3,1 cm). Ces signaux radar sont utilisés pour déterminer les élévations à une échelle quasi-globale. Cela a permis de réaliser une acquisition de l'élévation de plus de 90 % de la surface de la Terre. En termes quantitatifs, les données SRTM sont disponibles avec une résolution d'1 seconde d'arc (le maillage des points d'élévation étant d'environ 30 m par 30 m) pour les États-Unis et une résolution réduite à 3 secondes d'arc (environ 90 m par 90 m) pour le reste du monde [97]. SRTM couvre 80% du monde entre 60° Nord et 56° Sud. Les données SRTM sont exprimées dans le référentiel géodésique WGS-84, pour leur localisation au sol (latitude et longitude) et dans le référentiel altimétrique EGM-96 pour l'élévation du point précédemment localisé. Il est coutume d'assimiler le référentiel EGM-96 comme étant celui permettant de donner l'altitude d'un point par rapport au niveau moyen de la mer soit le géoïde MSL (Mean



Sea Level). On peut obtenir ces données à partir du site Internet [srtm.csi.cgiar.org](http://srtm.csi.cgiar.org) [58]. Les données SRTM sont fournies sous la forme de tuiles de 1° de longitude par 1° de latitude, accompagnées d'un fichier contenant la qualité de la mesure d'élévation en chaque point. Ces données sont stockées sous le format numérique HGT et codées sur 16 bits.

La première version du modèle SRTM consiste à délimiter les masses d'eau et définir au mieux les côtes mais comporte des données d'élévations n'ayant pas pu être mesurées. La précision verticale de ces données est de 16 m pour une précision horizontale d'environ 20 m. La seconde version du modèle permet la détection et l'élimination de certains artefacts si leur élévation dépasse 100 m par rapport aux altitudes environnantes. De plus, un traitement logiciel permet de compléter les valeurs d'élévation manquantes par l'insertion des élévations environnantes moyennées. Cependant, les points d'élévations des grands espaces non renseignés demeurent manquants. Dans cette version, l'élévation de l'océan est fixée à 0 m et la précision est nettement meilleure. Par contre, la troisième version traite les grandes zones vides, comme notamment les plans d'eau et les zones où les détails sont insuffisants pour produire des données d'élévation. Les erreurs verticales moyennes atteignent environ 5 m dans ces régions. Dans le cas des données SRTM, les zones sans données doivent être remplies ou interpolées. Il est préférable d'utiliser des sources auxiliaires de données MNE.

### 1.3.2.2 Modèle ASTER

En octobre 2011, le Ministère de l'économie, du commerce et de l'industrie du Japon (MITI) et la NASA ont annoncé la sortie du modèle numérique d'élévation ASTER GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model). L'objectif est de proposer un MNE gratuit de meilleure résolution horizontale et verticale, couvrant la quasi-totalité de la surface de la Terre. Le MITI a incité les utilisateurs à évaluer la qualité et la précision de ce nouveau produit. La construction de ce modèle est à la base de la corrélation de paires d'images stéréoscopiques du composant d'imagerie VNIR à 15 m de résolution du capteur du satellite ASTER. Il est généré à l'aide des bandes 3N et 3B qui permettent de détecter les grandes masses d'eau, généralement représentées par une valeur unique. Toutes les zones défailtantes, bien que peu fréquentes, restent telles qu'elles se présentent. La couverture de ce modèle est plus large que celle du modèle SRTM. Elle s'étend entre 83° Nord et 83° Sud, avec une résolution de 1 seconde d'arc. Ces données sont stockées sous le format numérique GeoTiff, dont les données sont codées sur 16 bits. Il est possible d'obtenir ces données à partir du site Internet [asterweb.jpl.nasa.gov](http://asterweb.jpl.nasa.gov). Il existe deux versions du MNE ASTER.

La première version, datant de juin 2009, offre une résolution 3 fois plus

fine que celle du MNE SRTM [123, 123], avec toutefois énormément d'anomalies et d'artefacts qui rendent les données difficilement exploitables et qui sont livrées sous forme de 22600 tuiles de 1° x 1°. Cette version est basée sur la fusion de 1264118 images de MNE en entrée, couvrant une période d'observation de 2000 à 2007. La précision verticale globale est d'environ 20 m avec un niveau de confiance de 95%. Il est important de noter que cette version de MNE est considérée comme étant de qualité "recherche" du fait de la présence d'un nombre significatif d'anomalies et d'artefacts constatées dans les données d'élévation [65].

En octobre 2011, le MITI a proposé la seconde version du MNE global ASTGER qui apporte un affinement global du produit et corrige certains artefacts, sans les supprimer en totalité comme les surfaces d'eau [123]. Elles sont livrées sous forme de 22702 tuiles avec un fichier contenant la qualité de la mesure d'élévation en chaque point. Elle est basée sur 1514350 images de MNE en entrée observées de 2000 à 2009. Cette version affiche une précision de 17 m avec un niveau de confiance de 95%.

Les données sont également définies dans le référentiel géodésique WGS-84 et les élévations dans le référentiel altimétrique EGM-96. De nombreuses études scientifiques ont été menées afin de valider la pertinence et la précision des données ASTER et SRTM [122, 28], parfois à partir de relevés GPS très précis.

### 1.3.2.3 Extension aux cartes de navigation 3D

De nos jours, il est possible de trouver des cartes de navigation routière 3D comme celles OpenStreetMap-3D (OSM-3D), Tele Atlas ou encore BD TOPO 3D. À terme, il faudrait que les "nœuds" des segments de route puissent tous contenir une troisième coordonnée standardisée représentant l'élévation, tout en utilisant une référence d'altitude [79]. Les types de cartes présentant une bonne précision sont également celles qui s'avèrent les plus coûteuses (jusqu'à 40000 euros environ).

BD TOPO est la modélisation 3D du territoire français et de ses infrastructures sous forme vectorielle des objets les constituant, comme par exemple les réseaux routiers qui nous intéressent ici. Les coordonnées sont exprimées en mètre et présentées dans plusieurs systèmes géodésiques comme RGF-93 et WGS-84, et le référentiel IAG GRS 1980 pour l'altitude [49, 7]. 98% du réseau routier est modélisé dans cette base de données qui peut s'avérer rapidement coûteuse.

OSM-3D ([www.osm-3d.org](http://www.osm-3d.org)) est un projet de recherche mené par le groupe de recherche GIScience de l'Université de Heidelberg. Ce groupe étudie la manière dont les informations géographiques et les ensembles de données librement disponibles peuvent être incorporés dans une infrastructure de données spatiales 3D à l'échelle mondiale. Leur génération est issue d'une fusion des données des cartes numériques 2D OSM avec le MNE SRTM. Pour chaque tuile des données

SRTM, des triangles sont construits à partir des points d'élévations échantillonnés et ensuite l'extrémité des segments routiers sont intégrées dans ces triangles pour déterminer les hauteurs des segments. L'accès à ces données est gratuit.

## 1.4 Méthodes d'estimation dynamique

L'estimation d'état représente une thématique importante dans le domaine des sciences de l'ingénieur. Le filtrage consiste à utiliser une série de mesures pour estimer les variables d'états d'un système dynamique.

Cette partie présente différentes méthodes d'estimation d'état. Nous présenterons les approches analytiques comme le filtre de Kalman et son extension tel que le filtre de Kalman étendu. Nous détaillerons ensuite les méthodes de filtrage fondées sur une discrétisation de l'espace d'état comme le filtrage particulaire.

### 1.4.1 Filtrage de Kalman

Le filtre de Kalman est une méthode de filtrage linéaire récursif qui a été développée en 1960 par R. Kalman [67]. Il fait partie des innovations les plus remarquables du 20<sup>ème</sup> siècle en sciences de l'ingénieur. Il propose une méthode d'estimation du vecteur d'état d'un système en fonction des observations, tout en minimisant l'erreur quadratique moyenne d'estimation. Le modèle d'état linéaire et gaussien à temps discret s'écrit comme suit :

$$\begin{cases} X_t = F_t X_{t-1} + W_t \\ Z_t = H_t X_t + V_t \end{cases} \quad (1.32)$$

où :

- $X_t$  est le vecteur d'état à l'instant  $t$ ,
- $Z_t$  est le vecteur d'observation à l'instant  $t$ ,
- $F_t$  et  $H_t$  sont les matrices de dynamique et d'observation du système,
- $W_t$  et  $V_t$  sont des bruits blancs gaussiens de moyenne nulle et de matrice de covariance  $Q_t$  et  $R_t$  respectivement.

La solution développée repose sur deux étapes : une étape de prédiction et une de correction. Elle s'écrit de manière récursive en s'appuyant sur les valeurs initiales de l'état  $X_0$  et de la matrice de covariance  $P_0$ .

#### 1.4.1.1 Prédiction

Le filtre utilise l'équation de dynamique du système pour calculer analytiquement et récursivement la prédiction des deux premiers moments de la loi conditionnelle de l'état connaissant les mesures jusqu'à l'instant  $t - 1$ , solution du

problème d'estimation. La prédiction de l'état du système est calculée à partir des équations suivantes :

$$\begin{cases} \hat{X}_{t|t-1} = F_t \hat{X}_{t-1|t-1} \\ P_{t|t-1} = F_t P_{t-1|t-1} F_t^T + Q_t \end{cases} \quad (1.33)$$

où :

- $\hat{X}_{t|t-1}$  et  $P_{t|t-1}$  sont la prédiction de l'état et la covariance de l'erreur de prédiction à l'instant  $t$  connaissant les mesures jusqu'à l'instant  $t - 1$ ,
- $F_t$  est la matrice de dynamique du système.

#### 1.4.1.2 Correction

Dans la phase de correction, l'observation  $Z_t$  à l'instant  $t$  est disponible. Le filtre délivre une estimation  $\hat{X}_{t|t}$  en utilisant l'écart entre l'observation  $Z_t$  et la mesure prédite  $\hat{X}_{t|t-1}$  pondérée par la matrice  $K_t$  appelée gain du filtre de Kalman. En d'autres termes, on utilise l'observation  $Z_t$  pour effectuer une mise à jour de la prédiction et de la covariance précédente, comme suit :

$$\begin{cases} \hat{X}_{t|t} = \hat{X}_{t|t-1} + K_t(Z_t - H_t \hat{X}_{t|t-1}) \\ P_{t|t} = (I - K_t H_t) P_{t|t-1} \\ K_t = P_{t|t-1} H_t^T (H_t P_{t|t-1} H_t^T + R_t)^{-1} \end{cases} \quad (1.34)$$

où :

- $(Z_t - H_t \hat{X}_{t|t-1})$  présente l'innovation du filtre,
- $P_{t|t}$  est la matrice de covariance d'erreur.

### 1.4.2 Filtrage de Kalman étendu

Le filtre de Kalman présente une solution optimale dans le cas de modèles linéaires gaussiens. Dans le cas non-linéaire (linéaire non-gaussien, non-linéaire non-gaussien ou non-linéaire gaussien), d'autres méthodes ont été développées pour adapter le filtre de Kalman. Une des extensions du filtrage de Kalman la plus populaire est le filtre de Kalman étendu [10, 81]. Elle repose sur le développement de Taylor au premier ordre des équations de dynamique et de mesure. Les équations du filtre de Kalman étendu sont données ci-dessous pour l'étape de prédiction :

$$\begin{cases} \hat{X}_{t|t-1} = F_t(\hat{X}_{t-1|t-1}) \\ P_{t|t-1} = \mathcal{F}_t P_{t-1|t-1} \mathcal{F}_t^T + Q_t \end{cases} \quad (1.35)$$

et l'étape de correction :

$$\begin{cases} \hat{X}_{t|t} = \hat{X}_{t|t-1} + K_t(Z_t - H_t(\hat{X}_{t|t-1})) \\ P_{t|t} = (I - K_t\mathcal{H}_t)P_{t|t-1} \\ K_t = P_{t|t-1}\mathcal{H}_t^T(\mathcal{H}_t P_{t|t-1}\mathcal{H}_t^T + R_t)^{-1} \end{cases} \quad (1.36)$$

$\mathcal{F}_t$  et  $\mathcal{H}_t$  représentent les matrices Jacobiennes des fonctions non-linéaires  $F_t$  et  $H_t$  respectivement :

$$\mathcal{F}_t = \left. \frac{\partial F_t(X_t)}{\partial X_t} \right|_{X_t = \hat{X}_{t|t-1}} \quad \mathcal{H}_t = \left. \frac{\partial H_t(X_t)}{\partial X_t} \right|_{X_t = \hat{X}_{t|t-1}} \quad (1.37)$$

Le filtre de Kalman étendu est utilisé dans de nombreux domaines [138]. Il est caractérisé par sa faible complexité algorithmique. Cependant, en raison des linéarisations, sa convergence n'est pas assurée.

### 1.4.3 Filtrage particulière

#### 1.4.3.1 Cadre général

Le filtre particulière [38], historiquement appelé « Bootstrap filter » [50] aussi méthode de Monte-Carlo séquentielle [42] repose sur une technique d'échantillonnage statistique. C'est une méthode dont l'objectif est de construire une approximation de la densité de probabilité conditionnelle par un ensemble d'échantillons pondérés. Il présente notamment l'avantage de proposer une solution performante pour prendre en compte des modèles non-linéaires et/ou non-gaussiens. D'un point de vue général, le filtre particulière est basé sur la génération d'un ensemble de  $N$  échantillons pondérés du vecteur d'état appelés particules  $\{X_t^i, w_t^i\}_{i=1}^N$ . Chacune de ces particules représente une possible valeur de l'état estimé. L'évolution des particules se fait selon le modèle dynamique du système. Initialement, on attribue à chaque particule  $X_t^i$  un poids normalisé  $w_t^i = \frac{1}{N}$ . Ensuite, ces poids sont mis à jour selon leur adéquation avec l'observation courante grâce à la fonction de vraisemblance. Le filtrage particulière présente l'avantage de pouvoir intégrer directement des modèles non-linéaires/non-gaussiens.

Soient les équations du modèle dynamique non-linéaire suivant :

$$\begin{cases} X_t = f(X_{t-1}) + \mathcal{V}_t^X \\ Z_t = h(X_t) + \mathcal{V}_t^Z \end{cases} \quad (1.38)$$

où :

- $X_t$  et  $Z_t$  sont les vecteurs d'état et d'observation respectivement,
- $f$  et  $h$  sont les fonctions non-linéaires de transition et d'observation respectivement,
- $\mathcal{V}_t^X$  et  $\mathcal{V}_t^Z$  sont les vecteurs de bruits blancs indépendants de la condition initiale  $X_0$ .

### 1.4.3.2 Echantillonnage séquentiel par importance

La théorie de l'estimation indique que toutes les informations pour estimer  $X_t$  sont contenues dans la densité de probabilité *a posteriori*  $p_{0:t}(X_{0:t}|Z_{1:t})$  de l'état  $X_t$  qui s'écrit comme suit :

$$p_{0:t}(X_{0:t}|Z_{1:t}) = \frac{p(Z_{1:t}|X_{0:t})p(X_{0:t})}{p(Z_{1:t})} \quad (1.39)$$

Pour les systèmes non-linéaires, la détermination analytique de la densité de probabilité *a posteriori*  $p_{0:t}(X_{0:t}|Y_{1:t})$  n'est généralement pas envisageable. Pour faire face à cette difficulté, une technique d'échantillonnage a été introduite. L'échantillonnage séquentiel par importance (en anglais SIS pour Sequential Importance Sampling) est la brique de base du filtrage particulaire, proposé dans les années 90 [13]. Il est basé sur l'approximation récursive de la densité de probabilité  $p(X_{0:t}|Z_{1:t})$  par une méthode d'échantillonnage pondérée [92].

On définit une densité  $q(X_{0:t}|Z_{1:t})$ , dont le support contient celui de  $p(X_{0:t}|Y_{1:t})$ , utilisé pour faciliter l'échantillonnage. Les  $N$  échantillons  $X_{0:t}^i$ ,  $\{i = 1, \dots, N\}$  sont issus de  $q(X_{0:t}|Z_{1:t})$ . Les poids non normalisés des échantillons sont définis par  $\tilde{w}_t^i = \frac{p(X_{0:t}^i|Z_{1:t})}{q(X_{0:t}^i|Z_{1:t})}$  et ceux normalisés  $w_t^i = \frac{w_t^i}{\sum_{i=1}^N w_t^i}$ . On peut donc écrire :

$$p(X_{0:t}|Z_{1:t}) \approx \sum_{i=1}^N w_t^i \delta_{X_{0:t}^i} \quad (1.40)$$

où  $\delta_X$  est la distribution de Dirac centrée au point  $X$ .

À l'instant  $t$ , l'approximation du filtre est obtenue par marginalisation de  $p(X_{0:t}|Z_{1:t})$  :

$$p(X_t|Z_{1:t}) \approx \sum_{i=1}^N w_t^i \delta_{X_t^i} \quad (1.41)$$

La complexité de l'échantillonnage de la densité  $q(X_{0:t}|Z_{1:t})$  augmente au cours du temps selon la dimension du vecteur  $X_{0:t}$ . Pour cela, on choisit d'utiliser une méthode d'échantillonnage séquentielle.

La forme récursive de l'équation 1.40 est obtenue par l'expression de  $p(X_{0:t}|Z_{1:t})$  en fonction de  $p(X_{0:t-1}|Z_{1:t-1})$ .

$$p(X_{0:t}|Z_{1:t}) = \frac{p(X_{0:t-1}|Z_{1:t-1})p(X_t|X_{0:t-1}, Z_{1:t-1})p(Z_t|X_t)}{p(Z_t|Z_{1:t-1})} \quad (1.42)$$

Comme  $X_t$  est markovien, on peut dire que  $p(X_t|X_{0:t-1}, Z_{1:t-1}) = p(X_t|X_{0:t-1})$ . Alors l'équation 1.42 se réécrit :

$$p(X_{0:t}|Z_{1:t}) = p(X_{0:t-1}|Z_{1:t-1}) \frac{p(X_t|X_{0:t-1})p(Z_t|X_t)}{p(Z_t|Z_{1:t-1})} \quad (1.43)$$

Pour aboutir à une formulation séquentielle du filtre, considérons une densité d'importance  $q$  sous la forme :

$$q(X_{0:t}|Z_{1:t}) = q(X_t|X_{0:t-1}, Z_{1:t})q(X_{0:t-1}|Z_{1:t-1}) \quad (1.44)$$

On remarque que si l'on dispose d'un échantillon pondéré  $\{X_{0:t-1}^i, w_{t-1}^i\}_{i=1}^N$  de taille  $N$ , il est possible d'obtenir un échantillon  $\{X_{0:t}^i, w_t^i\}_{i=1}^N$  en simulant  $X_t^i$  selon  $q(X_t|X_{0:t-1}^i, Z_{1:t})$  et en agrégeant cet échantillon au vecteur  $X_{0:t-1}^i$ . Le calcul du poids  $w_t^i$  se fait selon :

$$w_t^i \propto \frac{p(Z_t|X_t^i)p(X_t^i|X_{t-1}^i)p(X_{0:t-1}|Z_{1:t-1})}{q(X_t^i|X_{0:t-1}^i, Z_{1:t})q(X_{0:t-1}|Z_{1:t-1})} = w_{t-1}^i \frac{p(Z_t|X_t^i)p(X_t^i|X_{t-1}^i)}{q(X_t^i|X_{0:t-1}^i, Z_{1:t})} \quad (1.45)$$

Le but du filtrage est d'estimer la loi *a posteriori*  $p(X_t^i|Z_{1:t})$ . On a donc besoin de l'ensemble des particules  $\{X_{t-1}^i\}_{i=1}^N$  à l'instant précédent  $t-1$ . La méthode SIS peut alors être simplifiée en choisissant une densité d'importance  $q$  de manière à ce que  $q(X_t|X_{0:t-1}, Z_{1:t}) = q(X_t|X_{t-1}, Z_t)$ . Dans ce cas :

$$w_t^i \propto w_{t-1}^i \frac{p(Z_t|X_t^i)p(X_t^i|X_{t-1}^i)}{q(X_t^i|X_{t-1}^i, Z_t)} \quad (1.46)$$

Ensuite, les poids sont normalisés comme suit :

$$w_t^i = \frac{w_{t-1}^i}{\sum_{i=1}^N w_{t-1}^i} \quad (1.47)$$

Après évolution des particules et calcul des nouveaux poids, l'estimation de l'état est réalisée par approximation particulaire :

$$\hat{X}_{t|t} = \sum_{i=1}^N w_t^i X_t^i \quad (1.48)$$

### Algorithme SIS

---

**pour**  $i=1, \dots, N$  **faire**

- tirer  $X^i \sim q(X_0|Z_0)$
- calculer  $w_0^i \propto \frac{\mu_0(X_0^i)p(Z_0|X_0^i)}{q(X_0^i|Z_0)}$
- normaliser les poids  $w_0^i$

**fin pour**  
**pour**  $t=1, \dots, n$  **faire**  
**pour**  $i=1, \dots, N$  **faire**  
- [prédiction] tirer  $X_t^i \sim q(X_t^i | X_{t-1}^i, Z_t)$   
- [correction] calculer les poids  $w_t^i \propto w_{t-1}^i \frac{p(X_t^i | X_{t-1}^i) p(Z_t | X_t^i)}{q(X_t^i | X_{t-1}^i, Z_t)}$   
**fin pour**  
- normaliser les poids  $w_t^i, i = 1, \dots, N$   
- estimation de l'état à l'instant  $t$  :  $\hat{X}_{t|t} = \sum_{i=1}^N w_t^i X_t^i$   
**fin pour**

### 1.4.3.3 Echantillonnage avec ré-échantillonnage par importance

Cette méthode (en anglais SIR pour Sequential Importance Resampling) consiste à ajouter une étape de ré-échantillonnage dans l'algorithme SIS, dans le but d'éviter le phénomène de dégénérescence des poids des particules et d'assurer une diversité des particules. Par ailleurs, l'étape de ré-échantillonnage est essentielle dans le filtrage particulaire pour obtenir une convergence rapide et de bonnes précisions d'estimation [82]. Le filtre SIR peut se détailler comme suit :

#### Algorithme SIR

---

**pour**  $i=1, \dots, N$  **faire**  
- tirer  $X^i \sim q(X_0 | Z_0)$   
- calculer  $w_0^i \propto \frac{\mu_0(X_0^i) p(Z_0 | X_0^i)}{q(X_0^i | Z_0)}$   
- normaliser les poids  $w_0^i$   
**fin pour**  
**pour**  $t=1, \dots, n$  **faire**  
- [prédiction] tirer  $X_t^i \sim q(X_t^i | X_{t-1}^i, Z_t), i = 1, \dots, N$   
- [correction] calculer les poids  $w_t^i \propto w_{t-1}^i \frac{p(X_t^i | X_{t-1}^i) p(Z_t | X_t^i)}{q(X_t^i | X_{t-1}^i, Z_t)}, i=1, \dots, N$   
- normaliser les poids  $w_t^i, i=1, \dots, N$   
- estimation de l'état à l'instant  $t$  :  $\hat{X}_{t|t} = \sum_{i=1}^N w_t^i X_t^i$   
- calculer  $N_{eff}$  d'après l'équation 1.50  
- [ré-échantillonnage] si  $N_{eff} < N_{th}$  :  
 $[\{X_t^i, w_t^i\}_{i=1}^N] = \text{ré-échantillonnage} [\{X_t^i, w_t^i\}_{i=1}^N]$   
**fin pour**



- 
- Le processus de ré-échantillonnage est constitué de deux étapes :
- élimination des particules ayant un poids d'importance normalisé faible ;
  - démultiplication des particules ayant un poids d'importance normalisé élevé.

Le filtrage particulaire basé sur la méthode SIR améliore la performance du filtre et le rend plus stable. Cependant, l'effet de ré-échantillonnage introduit plusieurs effets indésirables. La duplication des particules de poids fort appauvrit le système de particules (phénomène connu par « sample impoverishment »), ce qui augmente la possibilité de divergence du filtre à cause de la perte de diversité. Pour limiter ce phénomène, une méthode consiste à choisir une loi d'importance différente du noyau de transition.

#### 1.4.3.4 Méthodes de ré-échantillonnage

L'étape de ré-échantillonnage a pour objectif de garantir la survie des particules significatives. Cette étape est basée sur la duplication des particules à fort poids et l'élimination des particules de poids faible [92, 82]. À chaque itération, l'ensemble des particules  $\{X_t^i, w_t^i\}_{i=1}^N$  sera remplacé par un autre ensemble  $\{X_t'^i, w_t'^i\}_{i=1}^N$  de façon à ce que la variance des poids soit réduite. Il existe deux critères pour le déclenchement de l'étape de ré-échantillonnage :

- le premier critère relatif à l'entropie des poids normalisés, introduit par Pham [101], est calculé selon l'équation suivante :

$$S_w = \log(N) + \sum_{i=1}^N w_t^i \log(w_t^i) \quad (1.49)$$

Lorsque tous les poids des particules sont normalisés à  $\frac{1}{N}$ , la valeur de l'entropie  $S_w$  est nulle, et si l'un des poids vaut 1 alors  $S_w = \log(N)$ . L'étape de ré-échantillonnage est déclenchée lorsque  $S_w$  dépasse un certain seuil  $S_{th}$  prédéfini.

- le deuxième critère de déclenchement sera l'indicateur de dégénérescence du filtre  $N_{eff}$  introduit dans Kong et al. [77].  $N_{eff}$  est l'indicateur du nombre d'échantillons qui contribue significativement à l'estimation de la loi  $p(X_t|Z_{1:t})$ . La valeur du  $N_{eff}$  est comprise entre  $1 \leq N_{eff} \leq N$ . Si  $N_{eff}$  est inférieur à un seuil prédéfini  $N_{th}$ , indiquant qu'un grand nombre des particules ont des poids faibles, l'étape de ré-échantillonnage sera appliquée. La formulation de calcul de  $N_{eff}$  peut se faire comme suit :

$$N_{eff} \approx \frac{1}{\sum_{i=1}^N (w_t^i)^2} \quad (1.50)$$

Plusieurs méthodes de ré-échantillonnage sont proposées dans la littérature, parmi lesquelles : le ré-échantillonnage multinomial, le ré-échantillonnage résiduel et le ré-échantillonnage stratifié/systématique.

**1.4.3.4.1 Ré-échantillonnage multinomial :** c'est la méthode de redistribution la plus courante. L'idée principale est de générer un ensemble de  $N$  numéros aléatoires  $u_i, \{i = 1, \dots, N\}$ , à partir de la distribution uniforme  $\mathcal{U}([0, 1])$ , qui seront utilisées pour sélectionner les particules [44]. Durant la  $n$ -ème sélection, la particule  $X_t^n$  est choisie si la condition suivante est satisfaite :

$$Q_t^{m-1} < u_t^n < Q_t^m \quad (1.51)$$

avec :

$$Q_t^m = \sum_{k=1}^m w_t^k \quad (1.52)$$

Ensuite, on affecte à chacune des particules un nouveau poids égal à  $w_t^i = \frac{1}{N}$ . Le ré-échantillonnage multinomial est également appelé ré-échantillonnage aléatoire simple. La complexité du calcul du ré-échantillonnage multinomial est élevée (de l'ordre  $N \times m$ ).

**1.4.3.4.2 Ré-échantillonnage résiduel :** le ré-échantillonnage résiduel est basé sur la duplication de particules à poids forts [84]. Il est constitué de deux étapes, la première étape dédiée à la duplication des particules ayant un poids plus grand que  $\frac{1}{N}$  et la deuxième liée aux particules restantes qui sont ré-échantillonnées aléatoirement en utilisant le reste des poids. Le nombre de duplication de la particule  $X_t^i$  est proportionnel à son poids. Il est calculé en multipliant le poids de la particule par le nombre total des particules  $N$  et en arrondissant à l'entier le plus proche :

$$N^i = Nw_t^i \quad (1.53)$$

Le nombre de particules restantes est  $\bar{N}_t = N - \sum_{i=1}^N N_t^i$ . Les  $\bar{N}_t$  particules sont alors échantillonnées selon un tirage multinomial de probabilité donnée par les poids résiduels  $\{\bar{w}_t^i\}_{i=1}^N$  définis par :

$$\bar{w}_t^i = \frac{Nw_t^i - N^i}{\bar{N}} \quad (1.54)$$

La complexité du calcul de ré-échantillonnage résiduel est d'ordre  $N + \bar{N}_t$  à chaque instant  $t$ .

**1.4.3.4.3 Ré-échantillonnage stratifié /systématique :** la méthode de ré-échantillonnage stratifié consiste à diviser l'intervalle  $[0, 1]$  en  $N$  sous-intervalles disjoints égaux selon la forme  $([0, 1/N] \cup \dots \cup [1 - 1/N, 1])$ . Ensuite, le tirage d'un ensemble de variables  $U_i, \{i = 1, \dots, N\}$  est fait selon une loi uniforme  $\mathcal{U}(\frac{i-1}{N}, \frac{i}{N})$ .

On sélectionne la particule d'indice  $j$  si  $U_i \in \left[ \sum_{i=1}^{j-1} w_t^i, \sum_{i=1}^j w_t^i \right]$ . Cette méthode offre une variance inférieure à celle de la méthode multinomiale [41].

Le ré-échantillonnage systématique est similaire au ré-échantillonnage stratifié mais  $U_i$  est donné par :

$$U_i = \frac{i-1}{N} + U \quad (1.55)$$

avec  $U \sim \mathcal{U}(0, 1/N)$ . La complexité de ces deux versions de ré-échantillonnage est d'ordre  $N$ . On remarquera que la méthode systématique est moins complexe que la méthode stratifiée en raison du nombre réduit de nombres aléatoires générés.

## 1.5 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté les briques de base du système de positionnement par satellites GNSS qui est le système le plus largement utilisé dans le monde aujourd'hui, en présentant son principe de fonctionnement. Nous avons présenté en détaille le système GPS avec ces principaux paramètres et son principe de fonctionnement. Mais, les erreurs typiques causées par la propagation du signal satellitaire dans l'atmosphère et celle liées au système satellite/récepteur s'ajoutent des erreurs particulières au contexte du transport terrestres. Nous avons présenté le principe de la localisation à l'estime, fondé sur l'utilisation des capteurs supplémentaires comme la centrale inertielle qui sera utilisée pour renforcer le système de positionnement par satellites. En plus, les cartes numériques routières et les modèles numériques d'élévation permettent également d'améliorer la localisation 3D du véhicule. Enfin, nous avons présenté les méthodes d'estimation d'état, basées sur le filtre de Kalman ou le filtrage particulaire.

# Chapitre 2

## Estimation des position et attitude d'un véhicule par fusion de données multi-capteurs utilisant le filtrage non-linéaire

### 2.1 Introduction

L'étude menée dans le chapitre précédent permet de mettre en évidence les briques de base de la navigation terrestre. Les méthodes de navigation utilisant des capteurs extéroceptifs/proprioceptifs, des cartes routières numériques et des modèles numériques d'élévation ont été largement détaillées. Dans ce chapitre, nous présenterons un système de fusion multi-capteurs pour l'estimation des paramètres de navigation d'un véhicule terrestre en milieu urbain. Nous focalisons sur l'estimation de la localisation 3D et l'attitude du véhicule. Ce système de fusion est basé à la fois sur un filtre non-linéaire et des algorithmes probabilistes de mise en correspondance cartographique afin de suivre le trajet d'un véhicule. Il intègre les mesures de positionnement GNSS, d'accélérations 3D délivrées par le récepteur u-blox EVK-M8U. Les résultats sont obtenus à partir de la fusion des données de la carte routière numérique OpenStreetMap (OSM) et de celles du modèle numérique d'élévation GDEM ASTER V2 via un filtre particulière afin d'améliorer les estimations.

Dans un environnement urbain, le positionnement GNSS devient souvent difficile à cause de la discontinuité de la localisation et la dégradation du signal. En effet, les satellites GNSS fournissent des signaux électromagnétiques qui peuvent être perturbés par des obstacles (arbres, bâtiments, tunnels, etc.). Pour procéder à une navigation sans dégradation de la précision, il est important d'inté-

grer le positionnement GNSS avec des systèmes de navigation inertielle fournissant des informations continues sur l'accélération, la vitesse angulaire et les angles d'attitude d'un mobile avec une précision relative. Mais la position calculée en fonction de l'intégration de ces paramètres dérive à cause de l'accumulation d'erreur. En conséquence, les capteurs inertiels sont des atouts pour assurer la continuité du positionnement dans le cas de défaillance du système GNSS [127].

Après l'intégration GNSS/INS, les résultats sont fusionnés avec la carte routière numérique OSM pour améliorer la localisation 2D au sol. OSM fournit des cartes routières numériques gratuites, via un web-service, et des informations enregistrées par l'utilisateur telles que normes, types, directions de circulation et inclinaisons de routes [21]. La problématique reste la sélection de la meilleure mesure cartographique permettant de corriger la localisation au sol du véhicule. Elle est résolue en se basant sur le critère de minimisation de la distance de Mahalanobis [86]. Par ailleurs, les données OSM ne fournissent aucune information d'altitude. Le modèle numérique d'élévation GDEM ASTER V2 présente des perspectives intéressantes pour l'amélioration d'estimation d'élévation du véhicule. Ce modèle présente une couverture mondiale avec une résolution horizontale trois fois plus précise que le modèle SRTM, soit de 1 seconde d'arc [123]. Ces données sont fournies sous la forme de tuiles d'1 degré de longitude par 1 degré de latitude, accompagnées d'un fichier contenant la qualité de chaque mesure d'élévation. Les coordonnées géographiques des données ASTER sont définies dans le référentiel WGS-84 et les élévations dans le référentiel EGM-96, qui est généralement assimilé à celui donnant l'élévation d'un point par rapport au géoïde du niveau moyen de la mer (MSL). Nous proposons également une nouvelle méthode de triangulation (TIN) [52, 29] de ces données d'élévations afin de limiter les erreurs d'altitude causées par le GNSS. Cet algorithme présente une nouvelle approche de fusion de données basée sur le filtrage particulière (FP). Ce filtrage est efficace pour les applications de navigation et a été largement discuté dans la littérature [13, 129]. Afin d'obtenir une convergence rapide et une bonne précision d'estimation, l'étape du ré-échantillonnage est essentielle dans le filtrage particulière [82]. La méthode proposée est évaluée à partir d'un scénario de réseau de transport urbain et les résultats expérimentaux montrent que l'estimateur proposé délivre avec une bonne précision le mouvement, la position et l'attitude du véhicule.

Ce chapitre est organisé comme suit : dans la section 2.2, nous présentons la modélisation du système de navigation 3D composé d'un modèle d'évolution et d'un modèle d'observation. Dans la section 2.3, nous détaillons la méthode de filtrage particulière permettant la fusion des données de la localisation GNSS, d'accéléromètres, de la carte OSM et du modèle ASTER. Enfin, les résultats expérimentaux obtenus à partir de données réelles sont présentés dans la section 2.4.

## 2.2 Modélisation du système de navigation 3D

La dynamique 3D du véhicule est modélisée par ses trois composantes : l'accélération  $\gamma$ , la vitesse  $v$  et la position. Ces caractéristiques sont représentées dans un vecteur d'état, nommé  $X_k$ , suivant les trois axes de coordonnées  $x$ ,  $y$  et  $z$  comme suit :

$$X_k = (\gamma_k^x, v_k^x, x_k, \gamma_k^y, v_k^y, y_k, \gamma_k^z, v_k^z, z_k)^T \quad (2.1)$$

Les coordonnées  $x$ ,  $y$  et  $z$  sont exprimées dans un repère ENU (UTM) avec  $z$  correspondant à l'altitude exprimée dans le référentiel EGM96.

### 2.2.1 Equation de dynamique du véhicule

La dynamique du véhicule peut être décrite par un ensemble d'équations cinématiques du troisième ordre à temps discret, suivant les trois axes de coordonnées  $u = \{x, y, z\}$ .

$$\begin{cases} \gamma_{k+1}^u = \gamma_k^u + \Omega_k^{\gamma^u} \\ v_{k+1}^u = \gamma_k^u \Delta_k + v_k^u + \Omega_k^{v^u} \\ u_{k+1} = v_k^u \Delta_k + u_k + \Omega_k^u \end{cases} \quad (2.2)$$

où :

- $\Delta_k$  est la période d'échantillonnage du système,
- $(\Omega_k^{\gamma^u}, \Omega_k^{v^u}, \Omega_k^u)$  sont des bruits additifs blancs gaussiens. Ces bruits prennent en compte les corrélations intrinsèques entre les trois composantes et nous permettent le suivi de véhicules à accélération variable.

La décomposition matricielle de l'équation 2.2 est présentée comme suit :

$$\begin{pmatrix} \gamma_{k+1}^u \\ v_{k+1}^u \\ u_{k+1} \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \Delta_k & 1 & 0 \\ 0 & \Delta_k & 1 \end{pmatrix}}_{F_u} \begin{pmatrix} \gamma_k^u \\ v_k^u \\ u_k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Omega_k^{\gamma^u} \\ \Omega_k^{v^u} \\ \Omega_k^u \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

Ensuite, l'équation de dynamique 3D du véhicule est présentée sous la forme matricielle suivante :

$$X_{k+1} = f(X_k, \Omega_k) = F X_k + \Omega_k \quad (2.4)$$

avec :

$$F = \begin{pmatrix} F_x & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & F_y & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & F_z \end{pmatrix} \text{ avec } F_x = F_y = F_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \Delta_k & 1 & 0 \\ 0 & \Delta_k & 1 \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

où :

–  $F$  est la matrice de transition qui décrit la dynamique du système, basée sur la période d'échantillonnage  $\Delta_k$  à laquelle les mesures sont délivrées et  $0_{3 \times 3}$  est une matrice carrée nulle de dimension  $3 \times 3$ .

–  $\Omega_k$  est la matrice du bruit blanc gaussien additif de moyenne nulle et de matrice de covariance d'erreur  $Q_k$ . Nous avons modélisé la matrice de covariance  $Q_k$  en négligeant les corrélations inter-paramétriques [17]. Nous avons supposé que les trois axes du capteur sont isolés les uns des autres.

$$Q_k = \begin{pmatrix} Q_k^x & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & Q_k^y & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & Q_k^z \end{pmatrix} \text{ avec } Q_k^x = Q_k^y = Q_k^z = \begin{pmatrix} \sigma_{\gamma_k^u}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{v_k^u}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{u_k}^2 \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

## 2.2.2 Equations de mesure

Dans notre méthode d'estimation, nous avons utilisé quatre types de mesures : des mesures du positionnement provenant d'un capteur GNSS, des mesures d'accélération obtenues à partir d'un capteur inertiel et des mesures de cartes numériques OSM et DEM utilisées comme des capteurs supplémentaires pour affiner la position 2D/3D.

### 2.2.2.1 Mesure du positionnement GNSS

Les mesures GNSS sont collectées par le récepteur u-blox EVK-M8U, dont l'antenne est fixée sur le toit du véhicule. Les mesures de la position sont exprimées dans le repère de navigation ENU (UTM). Ces mesures sont délivrées à une fréquence de 1Hz. Elles sont notées par  $\mathcal{Z}_{k+1}^{\text{GNSS}}$ . La forme matricielle des mesures est exprimée comme suit :

$$\mathcal{Z}_{k+1}^{\text{GNSS}} = \begin{pmatrix} x_{k+1}^{\text{GNSS}} \\ y_{k+1}^{\text{GNSS}} \\ z_{k+1}^{\text{GNSS}} \end{pmatrix} = H^{\text{GNSS}}(X_{k+1}) + \mathcal{V}_{k+1}^{\text{GNSS}} \quad (2.7)$$

avec :

–  $H^{\text{GNSS}}$  est la fonction linéaire de mesure GNSS donnée par :

$$H^{\text{GNSS}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

–  $\mathcal{V}_{k+1}^{\text{GNSS}} \sim \mathcal{N}(0, R_{k+1}^{\text{GNSS}})$  est la matrice du bruit blanc gaussien de moyenne nulle et de matrice de covariance d'erreur  $R_{k+1}^{\text{GNSS}}$ . La matrice de covariance des composantes de positionnement tridimensionnelles est diagonale :

$$R_{k+1}^{\text{GNSS}} = \begin{pmatrix} \sigma_{x^{\text{GNSS}}}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{y^{\text{GNSS}}}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{z^{\text{GNSS}}}^2 \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

### 2.2.2.2 Mesure de l'accélération du système inertiel

Les accélérations sont mesurées par un capteur inertiel triaxial intégré au kit EVK-M8U et liées au véhicule en mouvement. Elles sont exprimées dans le repère mobile B du capteur, qui est attaché à celui du véhicule. Les mesures d'accélérations sont délivrées à une fréquence de 1Hz et sont notées par  $\mathcal{Z}_{k+1}^{\text{ACC}}$  :

$$\mathcal{Z}_{k+1}^{\text{ACC}} = \begin{pmatrix} \gamma_{k+1}^x \\ \gamma_{k+1}^y \\ \gamma_{k+1}^z \end{pmatrix} = H^{\text{ACC}}(X_{k+1}) + \mathcal{V}_{k+1}^{\text{ACC}} \quad (2.10)$$

où :

–  $H^{\text{ACC}}$  est la fonction linéaire de mesure d'accélération, donnée par :

$$H^{\text{ACC}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

–  $\mathcal{V}_{k+1}^{\text{ACC}} \sim \mathcal{N}(0, R_{k+1}^{\text{ACC}})$  est un bruit blanc gaussien de moyenne nulle et de matrice de covariance  $R_{k+1}^{\text{ACC}}$ . Sous l'hypothèse que les erreurs sont mutuellement indépendantes,  $R_{k+1}^{\text{ACC}}$  est une matrice diagonale, définie par :

$$R_{k+1}^{\text{ACC}} = \begin{pmatrix} \sigma_{\gamma^x}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\gamma^y}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\gamma^z}^2 \end{pmatrix} \quad (2.12)$$



### 2.2.2.3 Mesure du réseau routier numérique OSM

Après la prise en compte des mesures GNSS et ACC, nous aurons besoin d'identifier la route parcourue par le véhicule pour augmenter la précision de la localisation au sol du véhicule. L'algorithme fusionne les paramètres estimés précédemment avec les données de la carte routière numérique OSM [21].

Les données cartographiques sont généralement extraites d'un Système d'Information Géographiques (SIG). Elles sont composées d'un ensemble des routes modélisées par des segments [55]. Chaque segment routier est caractérisé par deux extrémités nommées nœuds  $[N_1, N_2]$ . Les deux nœuds de segment constituent les principaux attributs. Chaque nœud est identifié par son emplacement au sol  $(x_{k+1}^{\text{OSM}}, y_{k+1}^{\text{OSM}})$  et son orientation  $\theta_{k+1}^{\text{OSM}}$ , comme illustré dans la figure 2.1. Ces données cartographiques sont établies comme candidats potentiels à l'équation de mesure. Chaque candidat est modélisé comme suit :

$$\mathcal{Z}_{k+1}^{\text{OSM}} = \begin{pmatrix} x_{k+1}^{\text{OSM}} \\ y_{k+1}^{\text{OSM}} \\ \theta_{k+1}^{\text{OSM}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{k+1} \\ y_{k+1} \\ \arctan\left(\frac{v_{k+1}^y}{v_{k+1}^x}\right) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathcal{V}_{k+1}^{\text{OSM},x} \\ \mathcal{V}_{k+1}^{\text{OSM},y} \\ \mathcal{V}_{k+1}^{\text{OSM},\theta} \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

Les mesures OSM sont modélisées sous la forme matricielle suivante :

$$\mathcal{Z}_{k+1}^{\text{OSM}} = h^{\text{OSM}}(X_{k+1}) + \mathcal{V}_{k+1}^{\text{OSM}} \quad (2.14)$$

où :

- $h^{\text{OSM}}$  est la fonction de mesure non-linéaire, qui relie le vecteur d'état aux mesures cartographiques,
- $\mathcal{V}_{k+1}^{\text{OSM}} \sim \mathcal{N}(0, R_{k+1}^{\text{OSM}})$  est la matrice du bruit blanc gaussien additif de moyenne nulle et de matrice de covariance  $R_{k+1}^{\text{OSM}}$ .

Une telle modélisation permet d'intégrer les aspects statistiques de la mesure cartographique liés aux hétérogénéités et erreurs des relevés de terrain.

$$R_{k+1}^{\text{OSM}} = \begin{pmatrix} \sigma_{x^{\text{OSM}}}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{y^{\text{OSM}}}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\theta^{\text{OSM}}}^2 \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

Nous sommes partis de l'hypothèse que les bruits ne sont pas corrélés, comme pour les mesures GNSS et ACC. Cette matrice intègre les erreurs de relevés calibrées par le fournisseur de la base de données cartographiques. Elle tient compte de l'échantillonnage spatial et de l'échelle de la carte OSM.

L'utilisation de ce type de mesures nécessite l'intégration d'une étape de mise en correspondance cartographique entre l'estimation GNSS/ACC et la carte

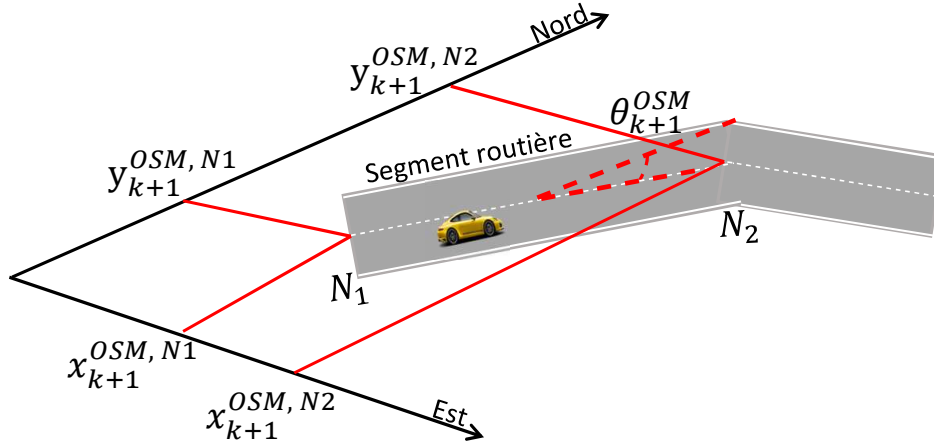


FIGURE 2.1 – Illustration des mesures cartographiques OSM

routière OSM [105]. Dans notre travail, nous avons choisi d'utiliser le critère de la distance de Mahalanobis pour réaliser la mise en correspondance cartographique [86].

#### 2.2.2.4 Mesure du modèle numérique d'élévations ASTER GDEM V2

La dernière étape du filtrage consiste à corriger l'altitude du véhicule. Il est connu que les données GNSS souffrent d'un grand taux d'erreur sur les mesures d'altitude [122]. Le rôle de cette étape est de limiter ces erreurs. L'algorithme fusionne les paramètres estimés précédemment, à l'aide de carte routière OSM, avec le modèle numérique d'élévations ASTER GDEM V2 [123]. La figure 2.2 illustre les données cartographiques globales de ce modèle. La résolution horizontale des données DEM est faible. Elle est de l'ordre de 1 seconde d'arc (environ 30 mètres), ce qui correspond à un échantillonnage spatial de  $19,51 \text{ m} \times 30,89 \text{ m}$  dans notre cas d'étude ramené à un référentiel UTM.

Ces données d'élévation sont caractérisées par leur localisation dans le repère ENU au sol  $(x_{k+1}^{\text{DEM}}, y_{k+1}^{\text{DEM}}, z_{k+1}^{\text{DEM}})^T$ . Les mesures sont modélisées de la manière

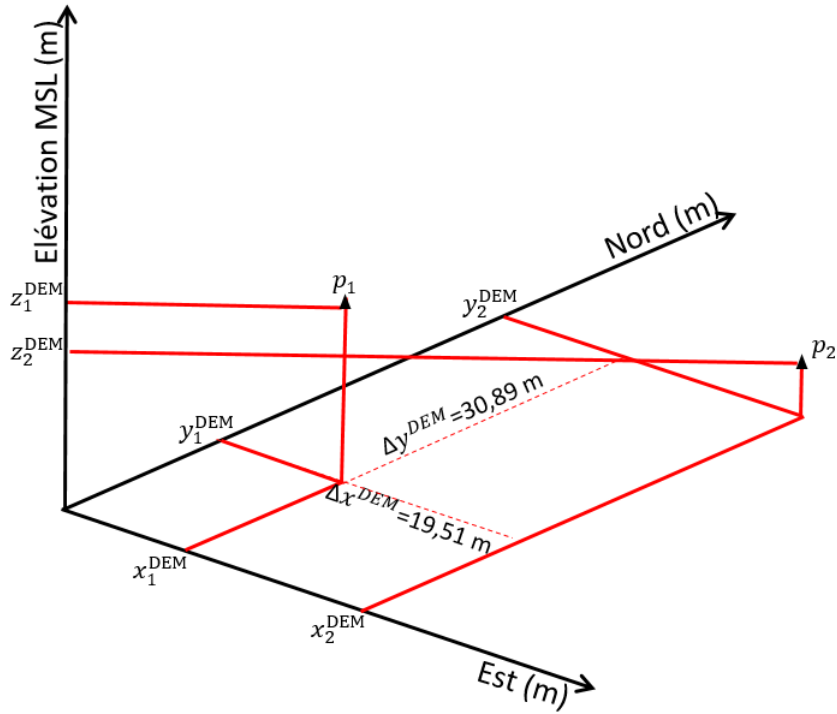


FIGURE 2.2 – Illustration des mesures du modèle numérique d'élévations ASTER

suivante :

$$\mathcal{Z}_{k+1}^{\text{DEM}} = \begin{pmatrix} x_{k+1}^{\text{DEM}} \\ y_{k+1}^{\text{DEM}} \\ z_{k+1}^{\text{DEM}} \end{pmatrix} = h^{\text{DEM}}(X_{k+1}) + \mathcal{V}_{k+1}^{\text{DEM}} \quad (2.16)$$

où :

–  $h^{\text{DEM}}$  est la fonction de mesure non-linéaire qui lie le vecteur d'état aux mesures du DEM, présenté par :

$$h^{\text{DEM}}(X_{k+1}) = \begin{pmatrix} x_{k+1} \\ y_{k+1} \\ z_{k+1} - \frac{H}{\cos(\alpha_{k+1})} \end{pmatrix} \quad (2.17)$$

–  $\mathcal{V}_{k+1}^{\text{DEM}} \sim \mathcal{N}(0, R_{k+1}^{\text{DEM}})$  est un bruit blanc gaussien additif de moyenne nulle et de matrice de covariance d'erreurs  $R_{k+1}^{\text{DEM}}$ . Cette matrice définit l'écart-type par rapport à la mesure de la position et de l'élévation.

$$R_{k+1}^{\text{DEM}} = \begin{pmatrix} \sigma_{x^{\text{DEM}}}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{y^{\text{DEM}}}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{z^{\text{DEM}}}^2 \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

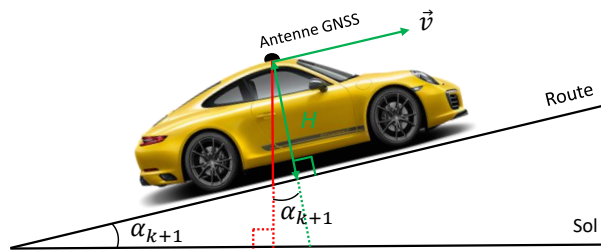


FIGURE 2.3 – Angle de tangage du véhicule

Comme illustré dans la figure 2.3,  $H$  définit la hauteur entre la route et le toit du véhicule où l'antenne du récepteur EVK-M8U est fixée. Le terme  $\alpha_{k+1}$  est l'angle entre le sol et le plan de la route à l'instant  $k + 1$ . Il est nommé également par l'angle de tangage et calculé comme suit :

$$\alpha_{k+1} = \arctan \left( \frac{v_{k+1}^z}{\sqrt{(v_{k+1}^x)^2 + (v_{k+1}^y)^2}} \right) \quad (2.19)$$

avec  $(v_{k+1}^x, v_{k+1}^y, v_{k+1}^z)$  sont les composantes du vecteur vitesse à l'instant  $k + 1$ .

## 2.3 Estimation de la localisation 3D et l'attitude du véhicule

Nous avons introduit précédemment une modélisation particulière du problème de localisation sur la carte routière OSM et modèle d'élévation ASTER GDEM V2 qui repose sur l'intégration d'erreur de statistiques liées à ces types

de données. Pour résoudre ce problème d'estimation, nous allons mettre en œuvre un filtre particulière. Celui-ci présente une capacité à traiter directement les systèmes non-linéaire/non-gaussiens. La figure 2.4 résume les principales étapes de notre méthode de fusion multi-capteurs. Elle est basée sur une structure de fusion centralisée. Le filtre traite séquentiellement les mesures de position GNSS, d'accélération, du réseau routier OSM et celles du DEM pour estimer l'état du système. L'explication des étapes de la méthode proposée est donnée par les sections suivantes.

### 2.3.1 Etape d'initialisation

On génère  $\{X_{0:k}^i, w_k^i\}_{i=1}^N$  un ensemble de mesures aléatoires caractérisé par la fonction de densité de probabilité postérieure  $p(X_{0:k}|\mathcal{Z}_{1:k})$  [13]. L'ensemble de ces particules  $\{X_k^i, i = 0, \dots, N\}$  est caractérisé par un ensemble de poids associé à chaque particule  $\{w_k^i, i = 0, \dots, N\}$  avec :

$$\sum_{i=1}^N w_k^i = 1 \quad (2.20)$$

La constante  $N$  est le nombre des particules de l'état  $X_k$ . Les poids initiaux  $w_0^i$  sont égaux et normalisés à  $\frac{1}{N}$  pour tout l'ensemble des particules.

### 2.3.2 Etape d'évolution des particules

L'ensemble des particules  $\{X_{k+1}^i, i \in N\}$  évolue selon le flot stochastique du système. Nous considérons l'étape d'évolution du vecteur d'état  $X_{k+1}^i$  donnée par l'équation de dynamique suivante :

$$X_{k+1}^i = F X_k^i + \Omega_k^i \quad (2.21)$$

où :

- $F$  est la matrice de transition linéaire décrivant la dynamique du vecteur d'état  $X_k^i$  à l'instant  $k$ ,
- $\Omega_k^i$  est le vecteur du bruit blanc gaussien additif.

### 2.3.3 Etapes de correction

Le filtre exploite les données de position GNSS, d'accélération, de la carte routière numérique et celles du modèle numérique d'élévations pour estimer les paramètres de la dynamique et du positionnement du véhicule. L'ordre

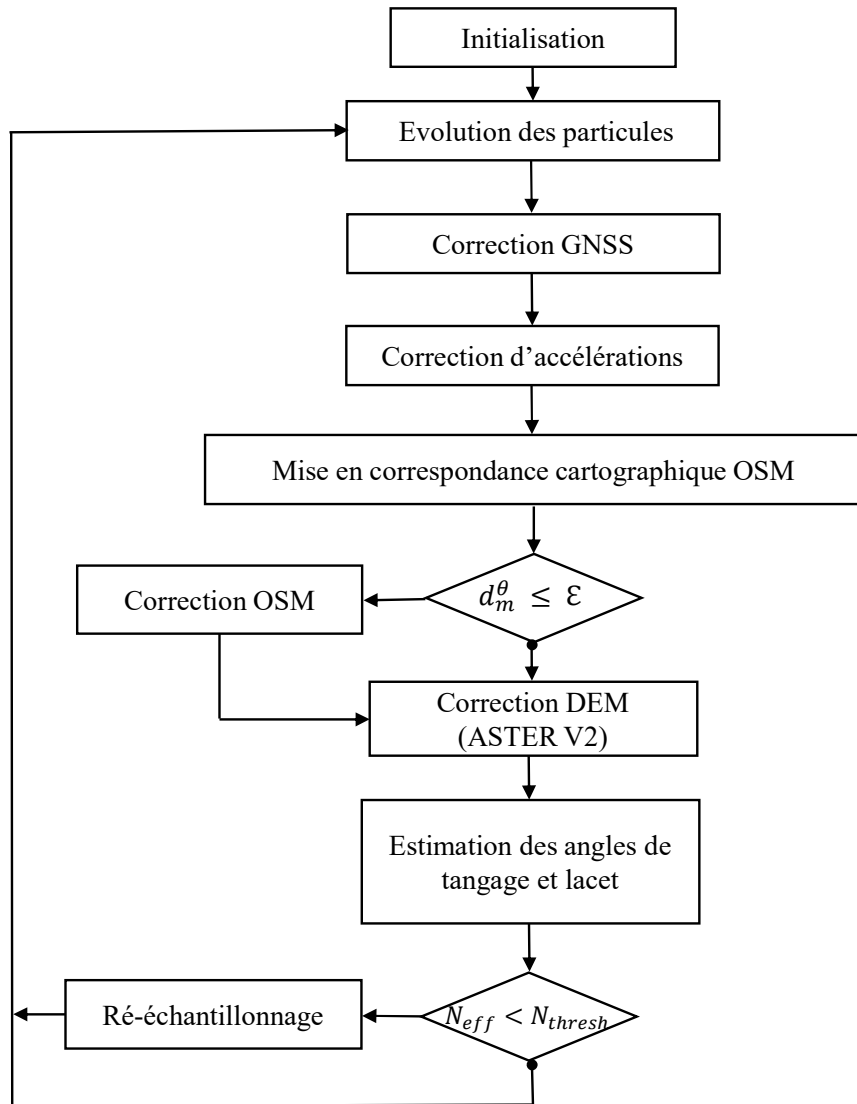


FIGURE 2.4 – Structure de la méthode de fusion

de traitement est choisi de sorte à limiter les erreurs des capteurs GNSS et des accéléromètres. Ensuite, la carte routière numérique est utilisée comme un capteur supplémentaire qui permet d'affiner la position GNSS au sol et le modèle d'élévations est utilisé pour corriger l'altitude du véhicule, en tenant compte des bruits inhérents à ces cartes.

### 2.3.3.1 Intégration des données GNSS

Cette étape consiste à corriger les positions prédites du vecteur d'état  $X_{k+1}$  en utilisant la mesure GNSS disponible à l'instant  $k + 1$ . La pondération des poids des particules consiste à corriger le poids normalisé de la particule  $w_{k+1}^i$  par la mesure GNSS disponibles à l'instant  $k + 1$ , suivant la règle de Bayes [13] :

$$w_{k+1}^{\mu,i} = \frac{P(\mathcal{Z}_{k+1}^\mu | X_{k+1}^i)}{\sum_{i=1}^N P(\mathcal{Z}_{k+1}^\mu | X_{k+1}^i)} w_k^{\mu,i} \quad (2.22)$$

La fonction de log-vraisemblance  $V_{(\mathcal{Z}_{k+1}|X_{k+1}^i)}$  s'écrit comme suit :

$$V_{(\mathcal{Z}_{k+1}|X_{k+1}^i)} \sim \ln(P(\mathcal{Z}_{k+1} | X_{k+1}^i)) \sim \|\mathcal{Z}_{k+1}^\mu - H^\mu X_{k+1}^i\|_{R^\mu}^2 \quad (2.23)$$

avec :

- $\mu$  représente les données du position GNSS disponibles à l'instant  $k + 1$ ,
- $\|\cdot\|_{R^\mu}^2$  est égal au  $(\cdot)^T R^{\mu-1}(\cdot)$

### 2.3.3.2 Intégration des données d'accélération

Cette étape a pour but de corriger le vecteur d'état  $X_{k+1}$  en se basant sur les mesures d'accélération disponibles  $\mathcal{Z}_{k+1}^{ACC}$  à l'instant  $k + 1$ . Les accélérations acquises par le capteur inertiel sont exprimées dans le repère mobile B du capteur représenté dans la figure A.1. Nous les transformons dans notre repère de navigation ENU.

Après cette étape de transformation, une étape de pondération des poids des particules est appliquée selon l'équation :

$$w_{k+1}^{\mu,i} = \frac{P(\mathcal{Z}_{k+1}^\mu | X_{k+1}^i)}{\sum_{i=1}^N P(\mathcal{Z}_{k+1}^\mu | X_{k+1}^i)} w_k^{\mu,i} \quad (2.24)$$

La fonction de log-vraisemblance  $V_{(\mathcal{Z}_{k+1}|X_{k+1}^i)}$  s'écrit de la même manière :

$$V_{(\mathcal{Z}_{k+1}|X_{k+1}^i)} \sim \ln(P(\mathcal{Z}_{k+1} | X_{k+1}^i)) \sim \|\mathcal{Z}_{k+1}^\mu - H^\mu X_{k+1}^i\|_{R^\mu}^2 \quad (2.25)$$

où  $\mu$  ici représente les données d'accélération disponibles à l'instant  $k + 1$ .

### 2.3.3.3 Gestion des données du réseau routier OSM

Après la prise en compte de la correction GNSS/ACC, une correspondance avec la carte routière numérique permet d'affiner le positionnement du véhicule au sol. Cette correspondance est basée sur la corrélation de la position 2D estimée avec les informations de la carte routière OSM. Afin de garantir la prise en compte des données cartographiques, nous calculons le vecteur d'état prédit intermédiaire :

$$\widehat{\mathcal{Z}}_{k+1/k+1}^{\text{OSM}} = \sum_{i=1}^N w_{k+1}^i h^{\text{OSM}}(X_{k+1}^i) \quad (2.26)$$

avec  $h^{\text{OSM}}$  est une fonction non-linéaire qui relie le vecteur d'état aux mesures cartographiques.

Afin de mettre en correspondance cette localisation  $\widehat{\mathcal{Z}}_{k+1/k+1}^{\text{OSM}}$  avec l'un des segments du réseau routier, de nombreuses méthodes ont été proposées pour affiner la localisation au sol à l'aide d'une base de données cartographiques. Une partie d'entre elles est basée sur des approches géométriques. Notre solution repose sur la minimisation de la distance de Mahalanobis [86] entre la position 2D prédite et chaque candidat du réseau routier OSM à l'instant  $k + 1$ .

Les réseaux routiers sont généralement modélisés par des nœuds interconnectés et géolocalisés selon une grille d'échantillonnage variable. Pour affiner la modélisation de la carte, chaque candidat à la procédure d'appariement est décrit par la projection orthogonale de la mesure prédite sur chaque segment de route numérique au voisinage du véhicule, si possible, sinon par l'extrémité la plus proche de cette projection. Cet ensemble de projections orthogonales est représenté par :

$$\mathcal{Z}_m^{\text{OSM}} = \text{proj}_{\perp, m} \left( \widehat{\mathcal{Z}}_{k+1/k+1}^{\text{OSM}} \right) \quad (2.27)$$

avec  $m = \{1, \dots, m_{\max}\}$  étant le nombre maximum de projections sur le réseau routier 2.27. Notre solution de mise en correspondance cartographique est basée sur la distance de Mahalanobis, qui prend en compte l'erreur de mesure cartographique présentée par la matrice de covariance d'erreur.

Puisque le descripteur des mesures de route contient aussi la direction de la route, le calcul de la distance de Mahalanobis  $d_m = d(\mathcal{Z}_m^{\text{OSM}}, \widehat{\mathcal{Z}}_{k+1/k+1}^{\text{OSM}})$  est adapté au cas des routes ayant deux sens de circulation  $(\theta_1, \theta_2)$  :

$$\begin{cases} \mathcal{Z}_m^{\text{OSM}, \theta_1} = (x_m^{\text{OSM}}, y_m^{\text{OSM}}, \theta_m^{\text{OSM}})^T \\ \mathcal{Z}_m^{\text{OSM}, \theta_2} = (x_m^{\text{OSM}}, y_m^{\text{OSM}}, \theta_m^{\text{OSM}} + \pi)^T \end{cases} \quad (2.28)$$



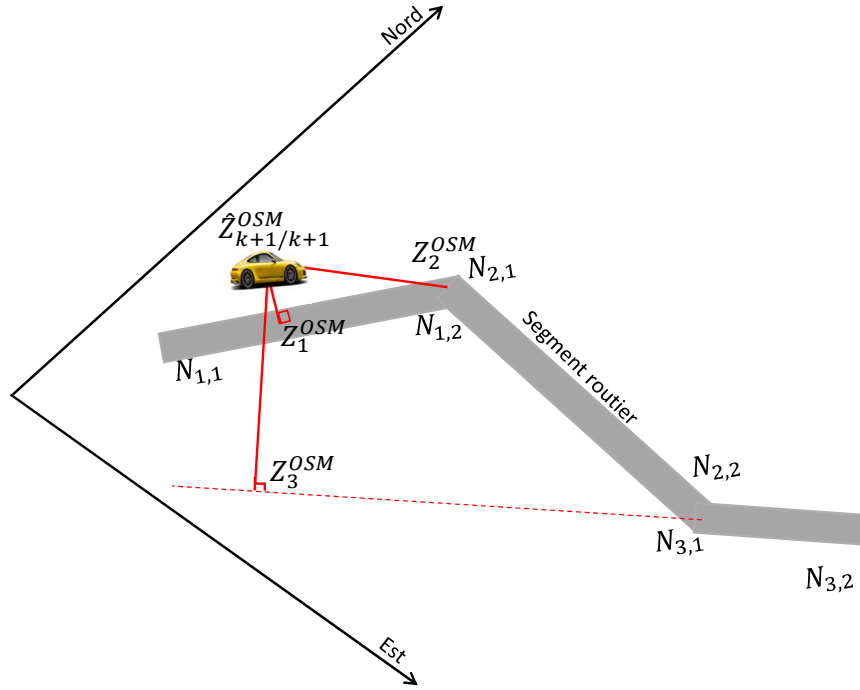


FIGURE 2.5 – Projection orthogonales sur les segments routiers

Ainsi, les distances de Mahalanobis peuvent être écrites pour  $(\theta_1, \theta_2)$  :

$$\begin{cases} (d_{m,k}^{\theta_1})^2 = (D^{\theta_1})^T (\tilde{P}_k^{\text{OSM}})^{-1} D^{\theta_1} \\ (d_{m,k}^{\theta_2})^2 = (D^{\theta_2})^T (\tilde{P}_k^{\text{OSM}})^{-1} D^{\theta_2} \end{cases} \quad (2.29)$$

avec :

- $D^{\theta_1} = \mathcal{Z}_{m,k}^{\text{OSM},\theta_1} - \hat{\mathcal{Z}}_{k+1/k+1}^{\text{OSM}}$ ,
- $D^{\theta_2} = \mathcal{Z}_{m,k}^{\text{OSM},\theta_2} - \hat{\mathcal{Z}}_{k+1/k+1}^{\text{OSM}}$ ,
- $\tilde{P}_k^{\text{OSM}}$  est la matrice de covariance d'erreur de la mesure cartogra-

phique prédite. Elle s'écrit comme suit :

$$\tilde{P}_{k+1}^{\text{OSM}} = \sum_{i=1}^N w_{k+1}^i (\mathcal{Z}_{k+1}^{\text{OSM},i})^2 - \left( \sum_{i=1}^N w_{k+1}^i \mathcal{Z}_{k+1}^{\text{OSM},i} \right)^2 \quad (2.30)$$

La correction est appliquée uniquement si un segment de route a été apparié sous la contrainte d'un seuil de décision  $\varepsilon$  :

$$d_m^\theta \left( \mathcal{Z}_m^{\text{OSM}}, \hat{\mathcal{Z}}_{k+1/k+1}^{\text{OSM}} \right) \leq \varepsilon \quad (2.31)$$

La mesure  $\mathcal{Z}_m^{\text{OSM}}$  qui minimise ce critère est utilisée pour corriger l'estimation calculée précédemment à l'aide des mesures GNSS.

Après détermination de la mesure  $\mathcal{Z}_m^{\text{OSM}}$ , nous recalculons les poids des particules  $w_{k+1}^i$  en utilisant la log-vraisemblance de l'équation :

$$V_{(\mathcal{Z}_{k+1}|X_{k+1}^i)} \sim \ln(P(\mathcal{Z}_{k+1}|X_{k+1}^i)) \sim \|\mathcal{Z}_{k+1}^\mu - H^\mu X_{k+1}^i\|_{R^\mu}^2 \quad (2.32)$$

où  $\mu$  représente ici la mesure  $\mathcal{Z}_m^{\text{OSM}}$ .

### 2.3.3.4 Gestion des données du modèle numérique d'élévations GDEM ASTER V2

Après la procédure de mise en correspondance cartographique OSM, la procédure de correction DEM vise à identifier l'élévation MSL du véhicule. C'est la dernière étape de la correction, pour fusionner l'estimation OSM précédente avec les données d'élévation ASTER. Les données d'élévation sont constituées d'une grille dont la résolution horizontale est fixée à 1 seconde d'arc dans un référentiel LLH [123]. L'objectif ici est d'atténuer les erreurs d'altitude dues au positionnement GNSS en utilisant les données ASTER comme base de référence. Dans le repère UTM, l'écart entre deux échantillons sera de 19,51 mètres vers l'Est et de 30,89 mètres vers le Nord.

Nous utilisons ici une méthode de triangulation (TIN) pour appliquer la correction d'altitude avec les données du modèle [29]. Cette méthode consiste à décomposer le modèle ASTER en triangles irréguliers. Par exemple, la figure 2.6 présente une partie des données ASTER. Les quatre points [A→D] sont les points de la grille 2D pour lesquels les altitudes MSL sont connues. Le polygone ABCD est divisé en deux triangles : le triangle #1 est composé des trois sommets A, B, C où A est le sommet principal. Le triangle #2 est composé des trois sommets B, C, D où D est le sommet principal du triangle. Ensuite, nous calculons les vecteurs normaux  $[\vec{n}_1, \vec{n}_2]$  des plans (ABC) et (BCD). L'état prédit intermédiaire OSM ( $M_0$ ) et le triangle sélectionné (ABC) sont présentés dans la figure 2.6.

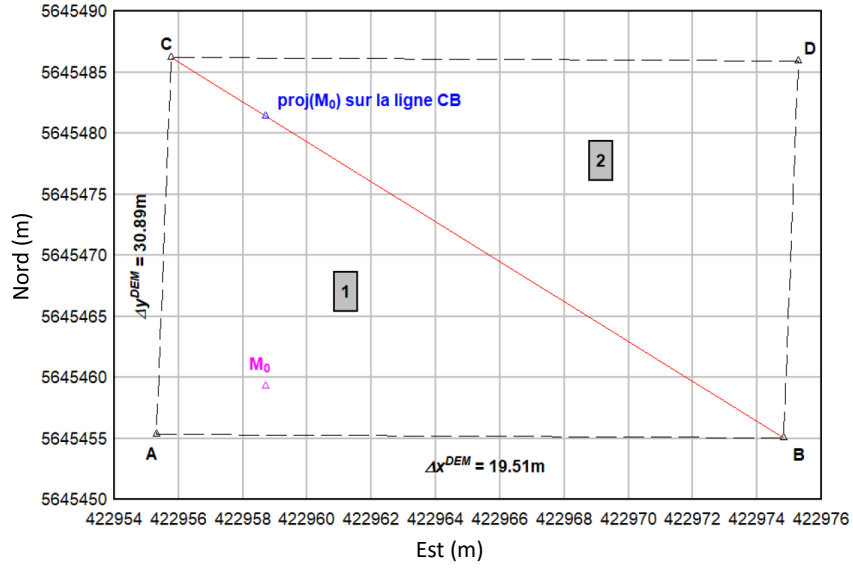


FIGURE 2.6 – Exemple de triangulation à partir du modèle ASTER V2

Pour qu'un point  $M = (x, y, z)^T$  appartienne à l'un de ces deux triangles, une condition nécessaire doit être validée :

$$\begin{cases} \overrightarrow{AM} \cdot \vec{n}_1 = 0 \text{ si } M \in (ABC) \\ \overrightarrow{DM} \cdot \vec{n}_2 = 0 \text{ si } M \in (BCD) \end{cases} \quad (2.33)$$

Ensuite, l'altitude  $z$  du point  $M$  peut être calculée à l'aide de l'équation 2.34 pour les deux hypothèses :

$$\begin{aligned} - \text{ si } M \in (ABC) : \quad z &= z_{i,j}^{\text{DEM}} + \frac{z_{i+1,j}^{\text{DEM}} - z_{i,j}^{\text{DEM}}}{\Delta x^{\text{DEM}}} (x - x_i^{\text{DEM}}) + \frac{z_{i,j+1}^{\text{DEM}} - z_{i,j}^{\text{DEM}}}{\Delta y^{\text{DEM}}} (y - y_i^{\text{DEM}}) \\ - \text{ si } M \in (BCD) : \quad z &= z_{i+1,j+1}^{\text{DEM}} + \frac{z_{i+1,j+1}^{\text{DEM}} - z_{i,j+1}^{\text{DEM}}}{\Delta x^{\text{DEM}}} (x - x_{i+1}^{\text{DEM}}) + \frac{z_{i+1,j+1}^{\text{DEM}} - z_{i+1,j}^{\text{DEM}}}{\Delta y^{\text{DEM}}} (y - y_{i+1}^{\text{DEM}}) \end{aligned} \quad (2.34)$$

L'estimation de l'altitude  $z$  est utilisé pour corriger les poids des particules en utilisant l'équation :

$$V(z_{k+1}|X_{k+1}^i) \sim \ln(P(z_{k+1}|X_{k+1}^i)) \sim \|z_{k+1}^\mu - H^\mu X_{k+1}^i\|_{R^\mu}^2 \quad (2.35)$$

où  $\mu$  présente la mesure  $z$ .

### 2.3.4 Estimation de la localisation 3D et l'attitude partielle

Le vecteur d'état du véhicule à l'instant  $k + 1$  résulte de la somme pondérée des particules  $X^i$  à l'instant  $k$  :

$$\hat{X}_{k+1} = \sum_{i=1}^N w_{k+1}^i X_k^i \quad (2.36)$$

Ensuite, nous pouvons calculer l'attitude du véhicule. L'angle de tangage  $\alpha_{k+1}$  présenté par la figure 2.3 est donné par l'équation suivante :

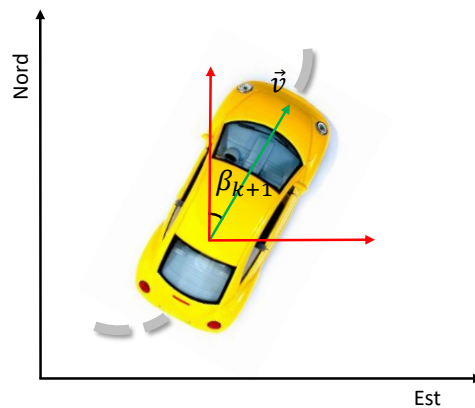


FIGURE 2.7 – Angle de lacet du véhicule

$$\alpha_{k+1} = \sum_{i=1}^N w_{k+1}^i \arctan \left( \frac{v_{k+1}^{z,i}}{\sqrt{(v_{k+1}^{x,i})^2 + (v_{k+1}^{y,i})^2}} \right) \quad (2.37)$$

De même, nous pouvons calculer l'angle de lacet  $\beta_{k+1}$ , présenté dans la figure 2.7, par l'équation suivante :

$$\beta_{k+1} = \sum_{i=1}^N w_{k+1}^i \arctan \left( \frac{v_{k+1}^{y,i}}{v_{k+1}^{x,i}} \right) \quad (2.38)$$

### 2.3.5 Ré-échantillonnage des particules

Au cours du temps, certaines particules auront un poids négligeable. Une étape de ré-échantillonnage ou de redistribution, est nécessaire pour éviter la dégénérescence des poids des particules [82]. Dans notre filtrage, nous utilisons la méthode la plus courante de redistribution celle de Ré-échantillonnage Multinomial.

Cette méthode est basée sur la sélection aléatoire des particules à répliquer. En premier temps, nous calculons un vecteur pour cumuler les poids des particules. Ensuite, un tirage de  $N$  valeurs aléatoires  $u_i$  tel que :

$$u_i \sim U[0, 1], i = 1, \dots, N \quad (2.39)$$

et on sélectionne pour chaque valeur de  $u_i$ , la particule  $j$ , où  $u_i$  est compris entre les deux valeurs cumulatives des poids avant la particule  $j$  et celle d'après :

$$\sum_{i=1}^{j-1} w_k^i < u_i < \sum_{i=1}^j w_k^i \quad (2.40)$$

Il est important de noter que le ré-échantillonnage multinomial est une des méthodes simples pour redistribuer l'ensemble des particules, mais elle augmente la variance de l'estimation [60].

## 2.4 Résultats expérimentaux

Pour valider les performances de la méthode proposée, nous l'avons appliquée sur des données réelles afin d'estimer la localisation 3D et l'attitude

d'un véhicule terrestre. Nous avons utilisé un récepteur GNSS/INS u-blox EVK-M8U, un réseau routier numérique OSM et un modèle numérique d'élévations ASTER GDEM V2. Les mesures ont été effectuées dans une zone péri-urbaine de la ville de Calais en France, comprenant une majorité de tracés autoroutiers en environnement ouvert.

### 2.4.1 Contexte d'expérimentation

Notre véhicule de test est équipé d'un récepteur u-blox EVK-M8U, permettant de collecter les positionnements GNSS, les accélérations du véhicule suivant les trois axes du repère mobile du véhicule [6]. Le récepteur est placé dans le coffre et l'antenne est fixée sur le toit du véhicule avec une hauteur mesurée  $H = 1,55\text{m}$ . Les mesures de positionnement 3D, les mesures d'accélération sont délivrées à la fréquence de 1Hz. La durée de l'acquisition des données est de 549 secondes.

Pour vérifier l'efficacité et la robustesse de notre méthode d'estimation, nous avons effectué l'acquisition sur des lignes droites et des courbes. Notre trajectoire commence par une pente ascendante pour prendre l'autoroute A216, ensuite une pente descendante à forte courbure (de 90 degrés à peu près) pour rejoindre l'autoroute A16, et enfin faire un virage ascendant pour retourner au point de départ en prenant le même chemin mais en sens inverse.

La vitesse moyenne atteinte par le véhicule est de 60 km/h (environ 16,5 m/s). La figure 2.8 montre le réseau routier OSM utilisé dans notre méthode, il est tracé directement sur le plan de la ville. Ces données routières sont composées de 417 segments de route modélisés par 73 polygones illustrés dans la figure 2.15.

La figure 2.9 présente les données d'élévation ASTER GDEM V2 de la surface du terrain à proximité du réseau routier OSM utilisé. Les données ASTER contiennent une grille de 14560 points d'élévation MSL dont la résolution horizontale est d'1 seconde arc. Il faut noter que cet ensemble de données peut contenir des artefacts. Chaque élévation répertoriée par le modèle est pourvue d'un paramètre de qualité indiquant la précision de la mesure. Ce paramètre peut être utilisé dans la procédure d'appariement des données DEM pour rejeter la mesure si elle était de piètre qualité [124].

Les matrices de covariance des bruits de mesures utilisées sont des matrices carrées d'ordre 3, dont les valeurs des écarts-types sont déterminées d'une manière expérimentale selon le contexte opératoire dans lequel le véhicule évolue.

Concernant le filtrage particulaire, le nombre de particules utilisé est déterminé de sorte à avoir un compromis entre l'efficacité du filtrage et le temps de calcul. Nous avons donc décidé, suivant nos expériences, de générer 100000 particules. Après l'estimation du vecteur d'état final, une étape de ré-échantillonnage sera appliquée. Le seuil de ré-échantillonnage peut être choisi selon  $N_{thresh} = \frac{2N}{3}$ .



FIGURE 2.8 – Réseau routier OSM

Dans notre cas, nous avons pris  $N_{thresh} = 0.1$ , c'est-à-dire que lorsqu'il y a plus de 10% des particules à faibles poids, il est nécessaire d'appliquer l'étape de ré-échantillonnage. La trajectoire de référence du véhicule est estimée à partir du traitement des données GNSS par filtrage particulaire avec un nombre de particules de 100000 pour avoir une référence quasiment proche à la réalité du terrain.

### 2.4.2 Estimation du mouvement du véhicule

Les figures 2.10 et 2.11 présentent les résultats d'estimation et les erreurs obtenus pour l'estimation des paramètres d'accélération et de vitesse 3D du véhicule. Les courbes rouges représentent les données de référence et les courbes bleues représentent les résultats obtenus par notre méthode d'estimation. Les courbes vertes correspondent à la différence entre ces deux courbes. Nous avons représenté également la norme 3D pour les deux paramètres dans les figures 2.12 et 2.13.

Les statistiques d'erreur donnent des écarts-types de l'ordre de  $0.24 \text{ m/s}^2$  pour le module d'accélération 3D et de  $1.2 \text{ m/s}$  pour le module de la vitesse 3D. Le tableau 2.1 présente les écarts-types et les erreurs moyennes pour les deux paramètres d'accélération et de vitesse selon les trois axes Est, Nord, et élévation MSL.

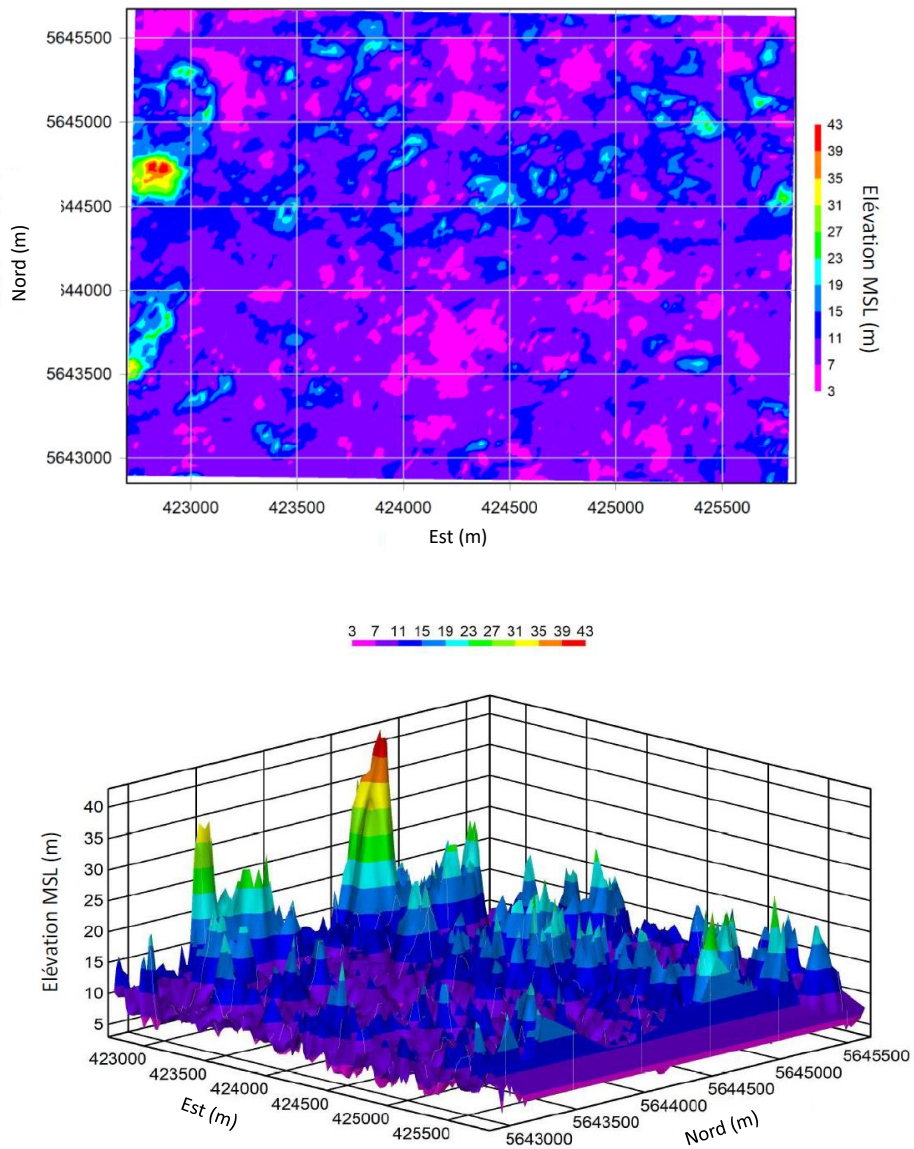


FIGURE 2.9 – Données du modèle numérique d'élévations ASTER GDEM V2

Les résultats permettent de montrer l'efficacité de la méthode proposée sur l'estimation de l'accélération et de la vitesse dans les différentes zones du trajet.



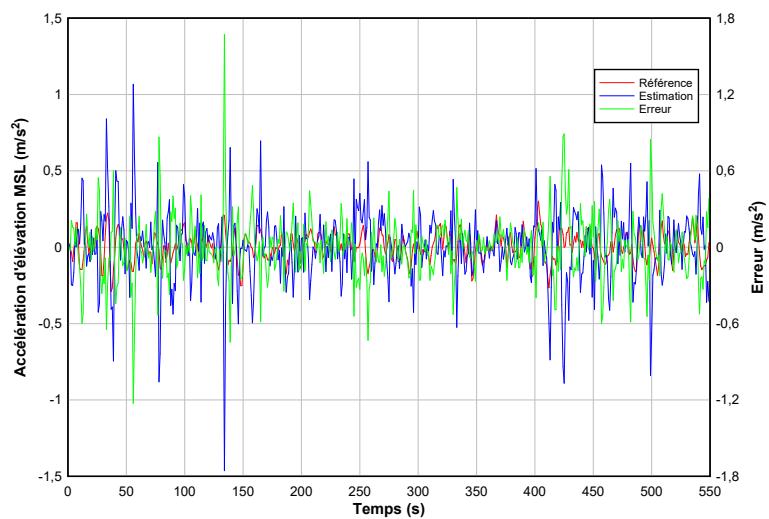
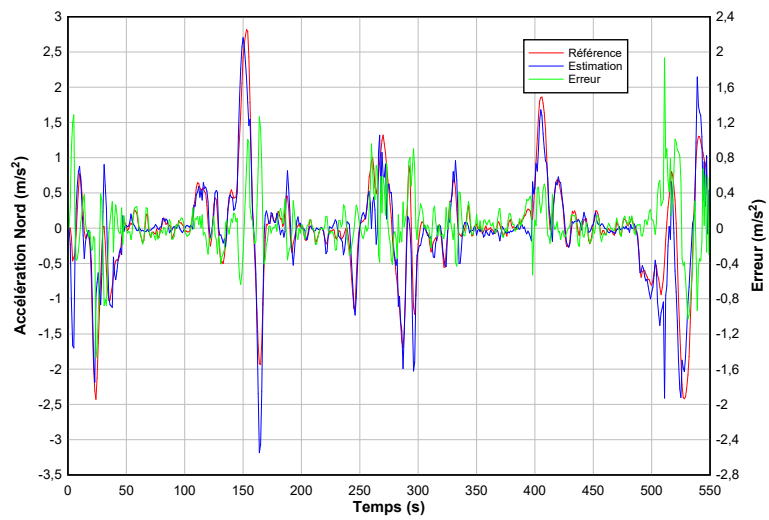
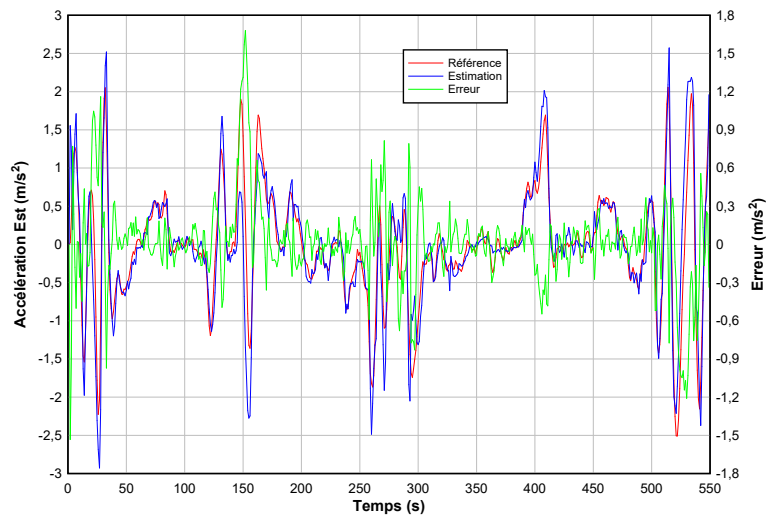


FIGURE 2.10 – Erreurs sur l'accélération du véhicule  
80

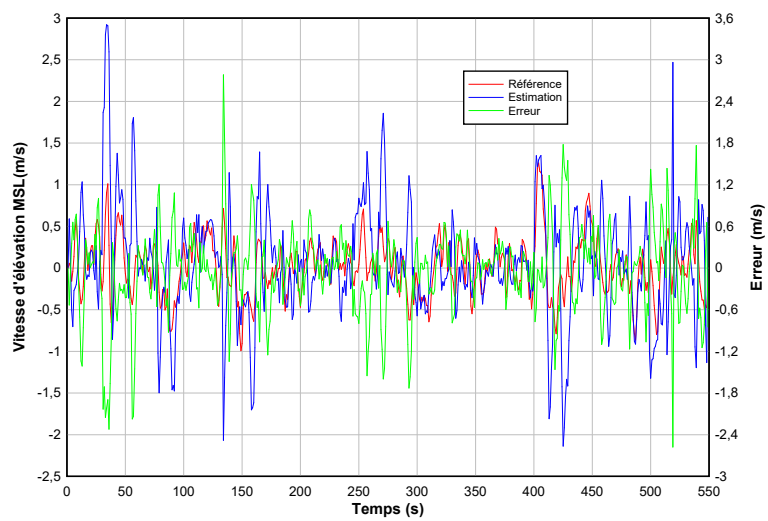
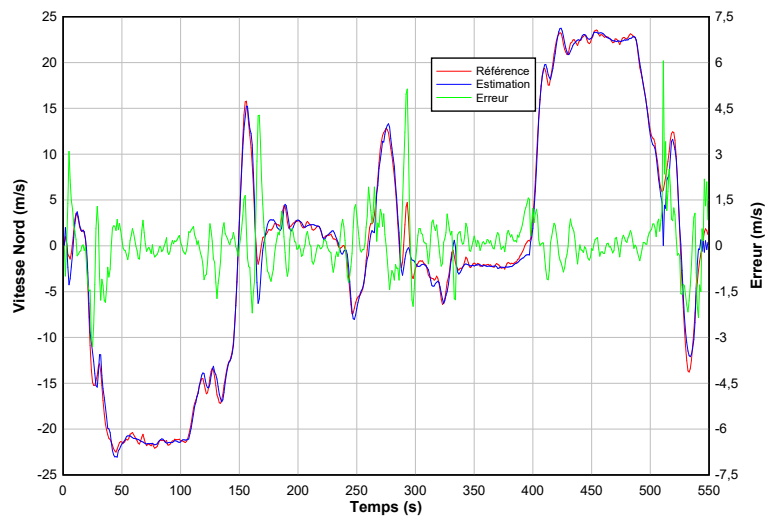
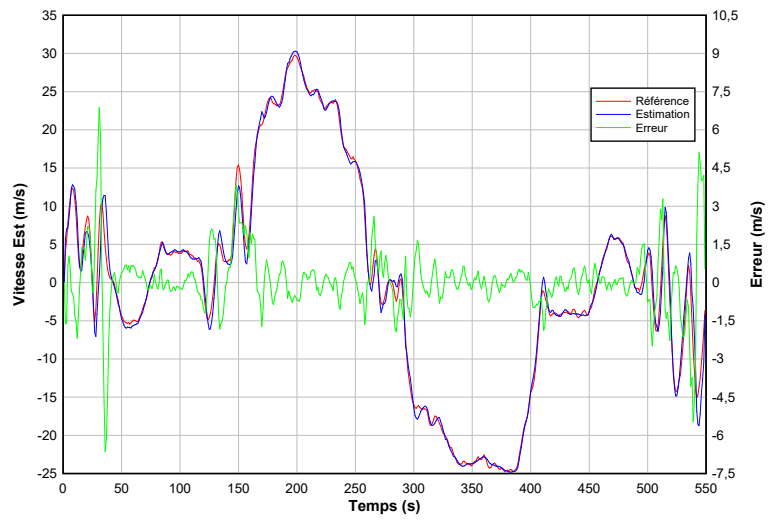


FIGURE 2.11 – Erreurs sur la vitesse du véhicule  
81

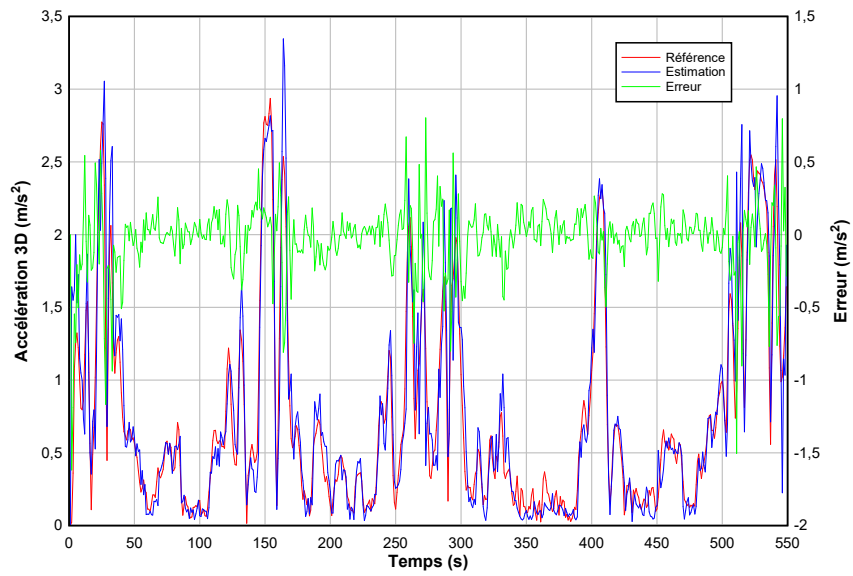


FIGURE 2.12 – Evolution temporelle d'accélération 3D

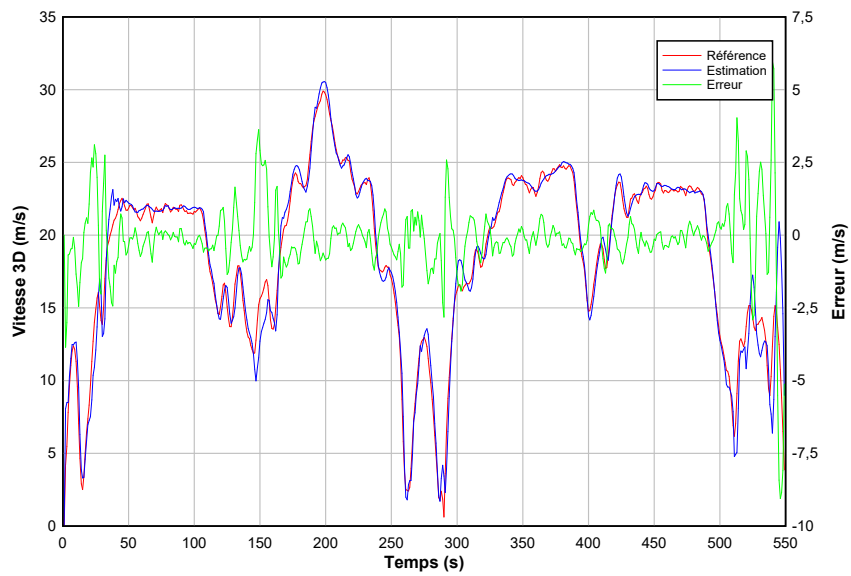


FIGURE 2.13 – Evolution temporelle de la vitesse 3D

TABLE 2.1 – Ecart-types et erreurs moyennes des accélérations et des vitesses 3D

		Ecart-type	Erreur moyenne
Accélérations (m/s <sup>2</sup> )	Est	0.34	$1.3 \cdot 10^{-2}$
	Nord	0.32	$3.8 \cdot 10^{-2}$
	Élévation MSL	0.20	$-2.1 \cdot 10^{-3}$
Vitesses (m/s)	Est	1.27	$6.9 \cdot 10^{-2}$
	Nord	0.94	$9.4 \cdot 10^{-2}$
	Élévation MSL	0.30	$-4.6 \cdot 10^{-3}$

### 2.4.3 Estimation de la position du véhicule

L'objectif principal de la méthode proposée est d'estimer la position 3D du véhicule. Une fois la correction par intégration GNSS/INS faite, l'étape d'association OSM permet de rechercher et de sélectionner le segment de route qui est utilisé par le véhicule dont le positionnement GNSS a été fusionné précédemment. Ensuite, la procédure d'appariement des données ASTER vise à identifier la zone d'élévation dans laquelle le véhicule circule.

Le critère de correspondance OSM est basé sur la distance de Mahalanobis. Le seuil de décision  $\varepsilon=2.55$  est choisi de manière expérimentale. Il définit les conditions dans lesquelles le réseau routier OSM existant peut être utilisé pour améliorer la position du véhicule au sol. On a également tracé l'évolution temporelle de la distance de Mahalanobis dans la figure 2.14, les valeurs correspondent au minimum des distances calculées à partir des candidats potentiels. Notre taux d'appariement de carte atteint environ 94.35%.

La figure 2.15 montre l'ensemble du réseau routier OSM présenté sous forme de segments colorés, ainsi que les points d'élévation MSL des données ASTER, représentés par des triangles en gris clair, de la zone d'étude. Les résultats de localisation au sol de la fusion des données GNSS/INS/OSM/ASTER par filtrage particulière sont tracés en carrés noirs.

La figure 2.16 présente l'évolution temporelle des composantes de position Est, Nord et élévation MSL du véhicule. Le module de l'erreur de positionnement 3D estimé est illustré par la figure 2.17. Le positionnement du véhicule est présenté en coordonnées UTM (Est, Nord et élévation MSL) et il est affiché à la fréquence de 1Hz. Le tableau 2.2 montre les écarts-types et les erreurs moyennes sur les composantes de la position estimée 3D. La valeur d'erreur maximale atteinte est d'environ 6 m. L'écart-type est de 0,90 m sur la position 3D. En plus, le taux de redistribution des particules reste limité à 57 % sur la séquence totale.

Ces résultats vérifient que la méthode proposée permet une estimation précise de la position 3D du véhicule.

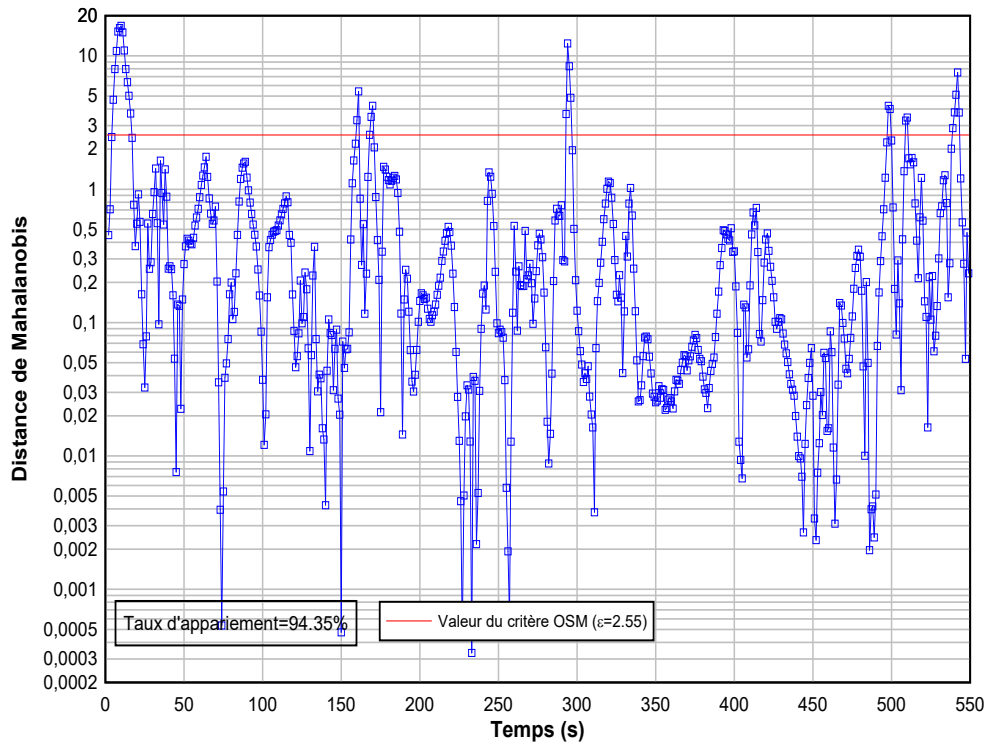


FIGURE 2.14 – Evolution temporelle du critère de distance de Mahalanobis

#### 2.4.4 Estimation de l'attitude partielle du véhicule

Dans cette section, nous allons estimer les angles de tangage et de lacet qui font partie des variables importantes du système de contrôle dynamique du véhicule. La figure 2.18 illustre l'évolution temporelle de l'angle de tangage estimé, représenté en courbe bleu. Elle est comparée à la pente des données de référence représentées en courbe rouge. Nous présentons l'erreur entre la courbe de référence et d'estimation en tant qu'erreur circulaire qui repose sur le calcul de  $\sin(\text{erreur})$ , présentée en courbe verte.

La figure 2.19 montre l'évolution temporelle de l'angle de lacet estimé en utilisant le même formalisme que celui-ci décrit précédemment. Pour l'angle de tangage, l'écart-type atteint 0.05 rad et l'écart-type atteint 0,14 rad pour l'angle de lacet. Les résultats, détaillés dans le tableau 2.3, des deux angles estimés convergent vers les données de référence, éliminant ainsi les erreurs causées par les biais des cartes numériques. Bien que, le filtre particulière soit limité par le temps de traitement, nous avons obtenu des résultats précis pour un nombre de particules  $N=100000$ .

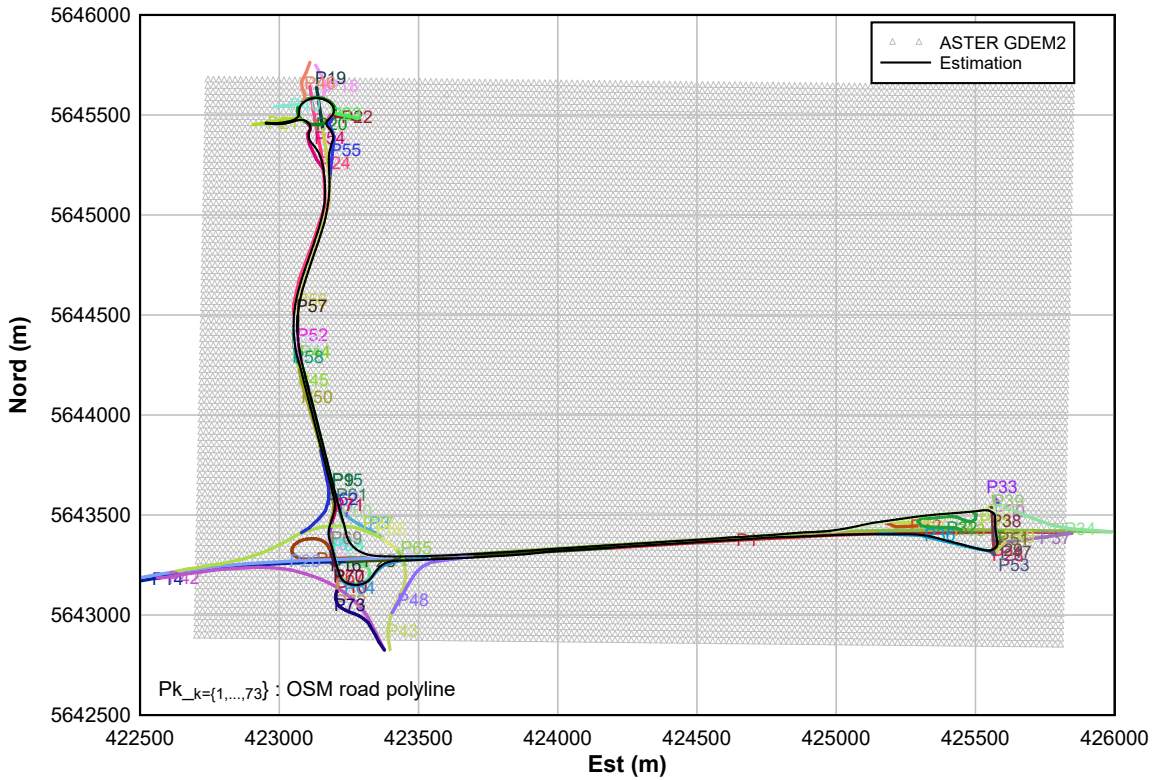


FIGURE 2.15 – Trajectoire du véhicule estimée par le filtre particulaire

Dans notre cas d'étude, l'angle de roulis n'était pas calculable à cause d'utilisation d'un seul capteur GNSS.

## 2.5 Conclusion

Ce chapitre présente une méthode générale d'estimation du mouvement et de la localisation 3D du véhicule à partir de la fusion des données de positionnement GNSS, d'accélération, d'un réseau routier OSM et d'un modèle d'élévation ASTER GDEM V2. La modélisation statistique des mesures permet de tenir en compte de leurs différentes précisions. Cette approche repose sur un filtre particulaire qui intègre les données GNSS avec les données INS et fusionne les données cartographiques modélisées comme des capteurs à part entière, de manière séquentielle, afin d'estimer le mouvement et les angles de lacet et de tangage du véhicule. Notre approche met également en évidence une méthode probabiliste de correspondance cartographique basée sur le calcul de la distance de Mahalanobis pour

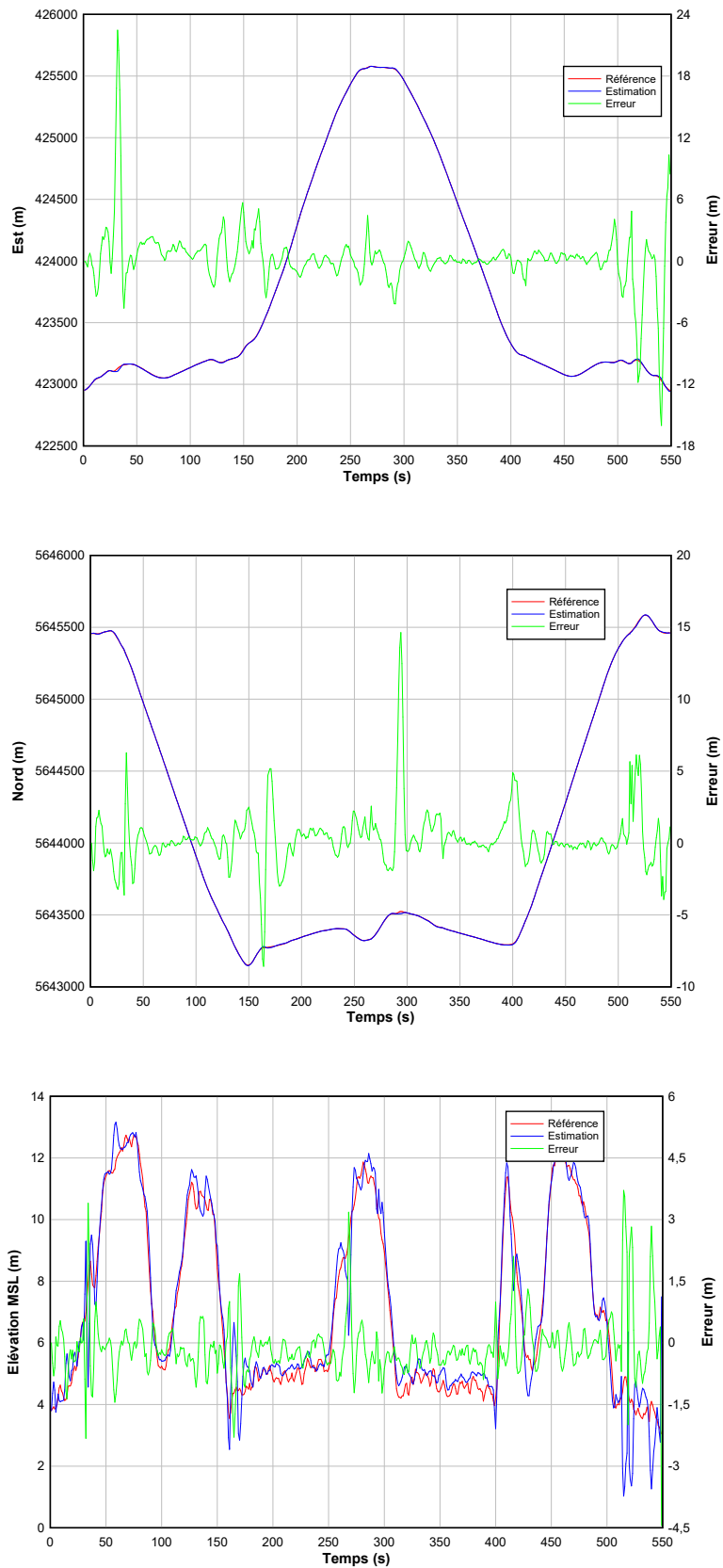


FIGURE 2.16 – Erreurs sur les paramètres de la position 3D du véhicule

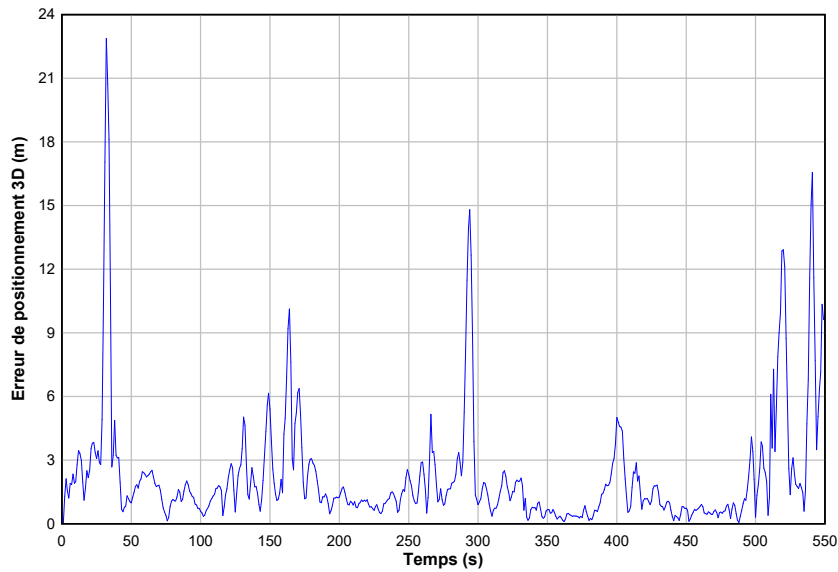


FIGURE 2.17 – Erreur de positionnement 3D

TABLE 2.2 – Ecart-types et erreurs moyennes de la position 3D

		Ecart-type	Erreur moyenne
Position 3D (m)	Est	2.8	$2.4 \cdot 10^{-1}$
	Nord	1.9	$3.2 \cdot 10^{-1}$
	Elévation MSL	0.6	$-1.1 \cdot 10^{-1}$

gérer les réseaux routiers numériques OSM qui permet d’identifier les segments de route parcourue. Les données ASTER V2 sont fusionnées via une méthode de triangulation qui permet de limiter les erreurs d’altitude causés par le système GNSS.

Les résultats présentés dans ce chapitre montrent l’efficacité de la méthode proposée et sa robustesse durant les périodes de changement rapide des conditions. Notons que les angles de lacet et de tangage peuvent être exploités pour la navigation des véhicules électriques afin d’améliorer la planification d’itinéraire en intégrant la topographie de la route. Ce cadre général et théorique peut être utilisé pour mettre en œuvre d’autres types de modèle d’élévation (World DEM par exemple). Il peut également servir à l’enrichissement des cartes routières OSM via l’ajout des inclinaisons des segments de route par exemple.



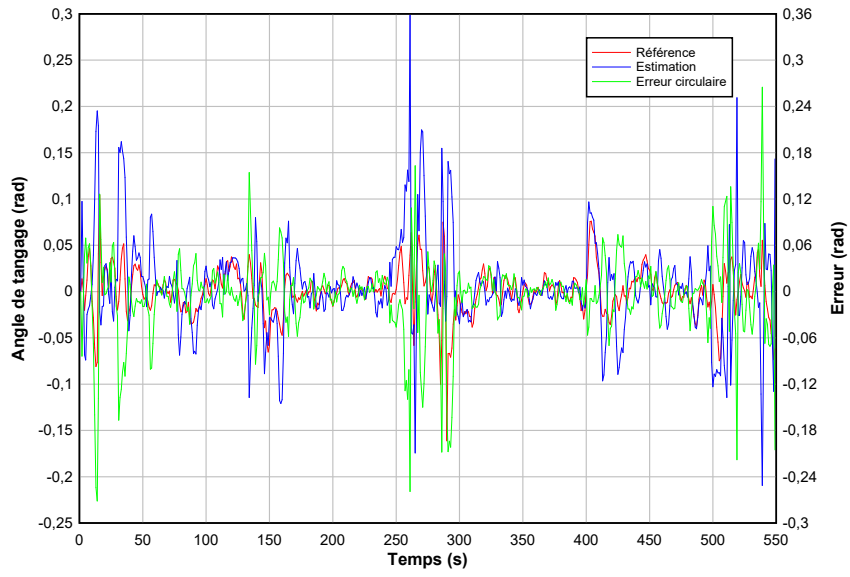


FIGURE 2.18 – Evolution temporelle de l'angle de tangage du véhicule

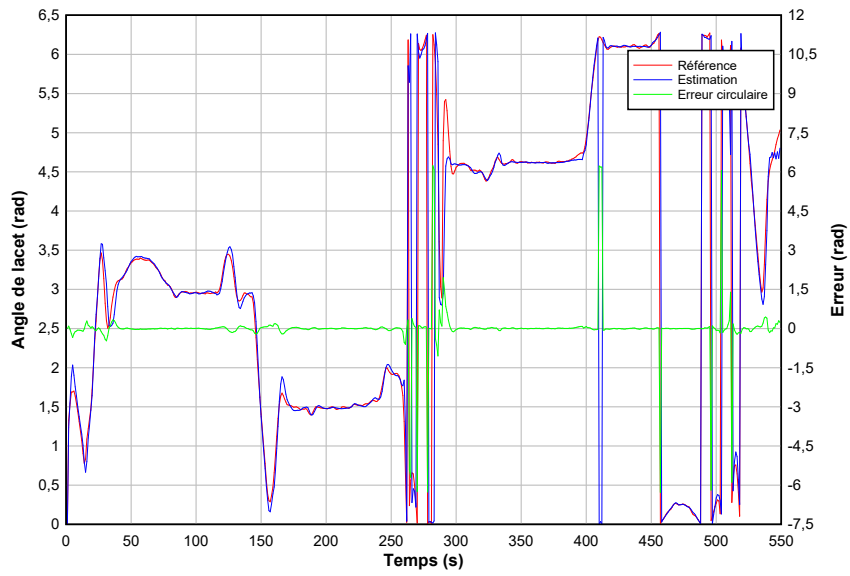


FIGURE 2.19 – Evolution temporelle de l'angle lacet du véhicule

TABLE 2.3 – Ecart-types et erreurs moyennes de l'attitude

		Ecart-type	Erreur moyenne
Attitude	Lacet	0.14	$1.0 \cdot 10^{-2}$
	Tangage	0.05	$-5.2 \cdot 10^{-3}$

# Chapitre 3

## Estimation des pentes des segments routiers par fusion multi-capteurs

### 3.1 Position du problème

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté une méthode d'estimation du mouvement, de la position 3D et de l'attitude partielle d'un véhicule à partir de l'intégration successive des mesures GNSS/INS et de cartes numériques OSM/ASTER. La méthode repose notamment sur une approche géométrique (Triangulated Irregular Network [117]) pour gérer le MNE ASTER. Dans ce chapitre, nous proposons une nouvelle méthode de gestion des données d'élévation afin d'améliorer l'estimation d'attitude du véhicule et de l'inclinaison des segments routiers.

Depuis ces dernières années, les véhicules électriques/hybrides présentent un intérêt considérable face aux besoins environnementaux et énergétiques, comme en attestent les travaux menés dans les universités et les industries. Les études ont porté sur le développement et l'amélioration des applications de transport et de contrôle de ces véhicules. Ces applications doivent avoir accès à des informations avancées telles que la situation du trafic, les informations sur la topographie du terrain et les réseaux routiers, le comportement de la conduite, etc. L'inclinaison du segment routier est l'une des informations utilisées dans ces applications de transport intelligent. Elle influe sur la qualité des planifications d'itinéraire pour les véhicules [70, 102, 47, 115]. Elle est aussi exploitée dans la gestion de la consommation d'énergie des véhicules électriques en permettant la sélection d'itinéraires plus adaptés [116, 16, 134] de sorte à assurer leur capacité à atteindre les stations de recharge. En conséquence, les véhicules hybrides voient leur consommation de carburant optimisée, ce qui a un impact positif sur l'environnement. De cette façon, les applications de transport intelligent permettent d'augmenter l'autonomie

[93] et d'accroître la sécurité de conduite [133, 11].

Dans la littérature, plusieurs méthodes ont été appliquées pour estimer l'inclinaison des routes. Des méthodes courantes utilisent le système GPS combiné avec le filtre de Kalman [66, 76, 83] pour calculer la différence entre les hauteurs estimées et mesurées [26] afin d'obtenir des informations sur la pente de la route. L'inconvénient de ces méthodes est qu'elles reposent majoritairement sur l'exploitation du GPS dont les difficultés de fonctionnement en milieu urbain sont bien identifiées. D'autres solutions sont basées sur l'utilisation de capteurs supplémentaires comme par exemple des accéléromètres [95, 139]. Raffone et al. [107], ont introduit une autre approche basée sur le filtre de Kalman avec l'algorithme récursif des moindres carrés pour estimer la pente de la route et la masse des véhicules. Les méthodes ci-dessus dépendent significativement de la précision du signal GPS ou de celles des capteurs supplémentaires (bruits intrinsèques, vibrations du véhicule, etc.).

Dans [29], les auteurs ont estimé les inclinaisons de segments routiers en se basant sur la fusion des données GPS, OSM et ASTER via un filtre de Kalman sans parfum (UKF). Ils ont présenté une méthode de triangulation pour modéliser les données d'élévation. Celle-ci est basée sur la sélection de trois points d'élévation composant un triangle, au voisinage de la projection de l'altitude estimée. Sa mise en œuvre conduit au calcul de l'inclinaison du segment routier parcouru.

Dans ce contexte, nous présentons une nouvelle méthode statistique de gestion du MNE. L'idée de l'utilisation d'un MNE vise à réduire les erreurs d'estimation d'altitude issues des systèmes GNSS. Cette méthode sélectionne les données d'élévation qui entourent le segment de route parcourue par le véhicule, selon une nouvelle méthode désignée par « Fenêtre Glissante Adjacente » (FGA). La sélection consiste à choisir l'ensemble de données d'élévation les plus proches possible du segment. Cette sélection crée une corrélation entre les instants où le véhicule se trouve sur le même segment routier. Cette corrélation entre les élévations estimées sur le même segment routier affecte la précision d'estimation des inclinaisons et réduit l'effet des artefacts sur le calcul. Dans un premier temps, cet ensemble des mesures sélectionnées par la méthode FGA conduit à une amélioration d'estimation de l'altitude du véhicule. Ensuite, ces élévations estimées sont utilisées pour calculer la pente des segments. Il est à noter que la méthode proposée reste applicable à tous types de MNE et que son efficacité augmente avec la précision intrinsèque de ces modèles.

Ce chapitre est composé de quatre parties. Le paragraphe 3.2 présente notre nouvelle méthode de gestion des données d'élévation. Dans le paragraphe 3.3, nous présentons la modélisation des mesures utilisées puis la méthode de fusion des données GNSS, INS, cartographiques OSM et World 30 est présentée dans la section 3.4. Enfin, les résultats expérimentaux obtenus à partir de données réelles

sont présentés dans le dernier paragraphe 3.5 de ce chapitre.

## 3.2 Nouvelle méthode de gestion des données d'élévation

Dans cette section, nous proposons une nouvelle méthode de gestion des données d'élévation (FGA) basée sur une approche statistique. Notre méthode consiste à intégrer le MNE en tant que capteur supplémentaire dans la chaîne de fusion de données afin d'améliorer l'estimation d'altitude et d'attitude. Cette amélioration influe directement sur l'estimation des inclinaisons de segments.

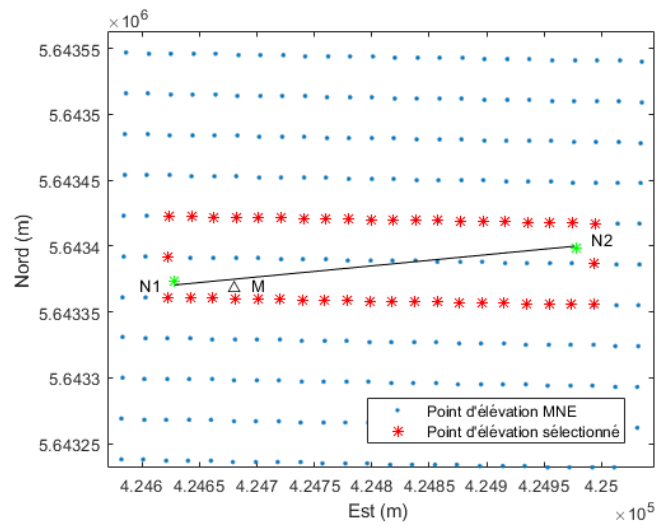
La modélisation est constituée de deux phases : la sélection d'ensemble de points d'élévation qui entourent le segment routier et le calcul d'une mesure d'altitude qui sera utilisée durant la correction. Nous utilisons la projection orthogonale pour sélectionner le segment routier parcouru par le véhicule. Ensuite, nous traitons les données d'élévation MNE brutes pour produire l'ensemble des points qui entourent le segment. Ce traitement est lié à la résolution spatiale du modèle d'élévation, à la topologie du terrain et à la présence des artefacts.

L'avantage d'une approche basée sur une fenêtre glissante est d'une part qu'elle crée une corrélation entre les instants où le véhicule est sur le même segment routier et d'autre part elle prend en compte la topologie du terrain qui entoure le segment. Par exemple, la présence d'une grande différence d'élévation entre la route et son environnement proche, comme la présence de reliefs divers (montagnes, colline, vallée, etc.) influe significativement sur le calcul. Nous nous sommes basés sur l'hypothèse que chaque polygone du réseau routier numérique est divisée en segments caractérisés par leur inclinaison.

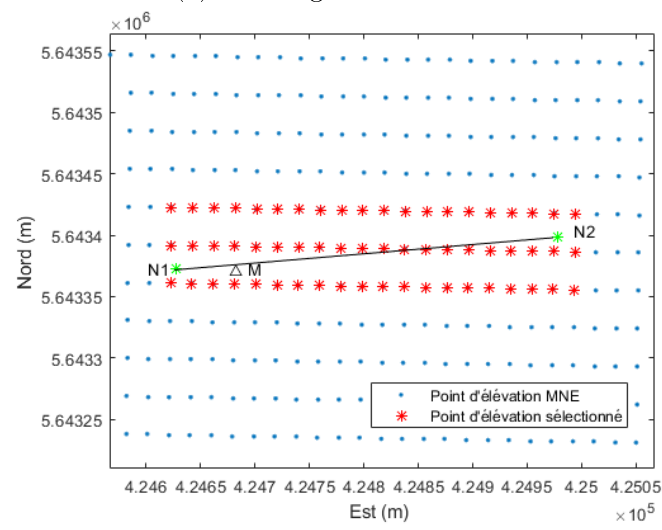
L'intérêt de l'approche FGA est qu'elle permet d'envisager plusieurs méthodes de sélection des points d'élévation selon le contexte d'expérimentation. La forme et la taille de la fenêtre ainsi que le nombre de points sélectionnés varient en fonction de la méthode choisie. Dans notre approche, nous avons proposé trois méthodes de sélection. La figure 3.1 présente une partie des données d'élévation pour un segment routier donné et les trois possibilités de sélection des points.

Les points  $[N1, N2]$  sont les extrémités du segment routier et le point  $M$  présente la position d'état prédite intermédiaire. Les points colorés en rouge constituent l'ensemble des points sélectionnés par la fenêtre. Les figures ??, ?? et ?? représentent, respectivement, la sélection d'un rectangle vide qui entoure le segment routier, la sélection d'un rectangle plein autour du segment et la sélection des points par les rectangles les plus proches qu'entourent le segment.

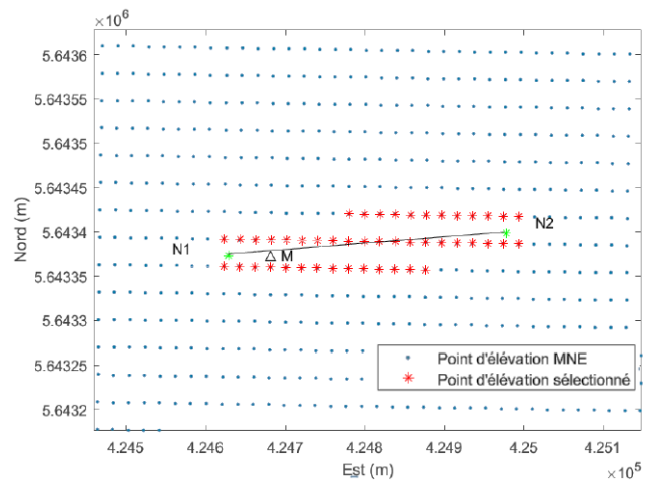
Après une étude expérimentale, nous avons décidé d'utiliser la troisième méthode de sélection des points appelée par méthode FGA. Elle s'adapte à notre



(a) Rectangle vide



(b) Rectangle plein



(c) Fenêtre Glissante Adjacente

FIGURE 3.1 – Exemples de modèles de sélection

objectif d'estimation de l'inclinaison du segment. Dans notre cas, la méthode FGA sélectionne l'ensemble des points d'élévation au voisinage du segment [N1N2]. Il convient de noter que la taille de cette fenêtre est approximativement déterminée suivant la résolution spatiale des données d'élévation utilisées. L'avantage de cette modélisation est qu'elle minimise l'effet de l'environnement proche de la route (variation de la topologie) sur le calcul de l'inclinaison. De plus, son efficacité réside également dans le fait qu'elle prenne en considération le segment complet que le véhicule parcourt. L'ensemble des points sélectionnés  $(x_i, y_i, z_i), i = 1, \dots, m$  peut-être représenté par un nuage de points dans le plan 3D :

$$\mathcal{Z}_m^{\text{DEM}} = \{X_{k+1}^{\text{DEM},i}\}_{i=1}^m \quad (3.1)$$

avec  $m$  est le nombre total des points sélectionnés.

Le centre de gravité  $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$  de ce nuage peut-être calculé selon les équations :

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i \\ \bar{y} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_i \\ \bar{z} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m z_i \end{cases} \quad (3.2)$$

Une méthode de mise en correspondance est alors nécessaire pour appairer la mesure prédite avec les mesures d'élévation. Notre solution est basée sur la méthode des moindres carrés, qui nous permet de calculer l'équation du plan moyen 3D.

On détermine l'équation du plan 3D optimal au sens des moindres carrés à partir des observations  $z_i$  :

$$z_i = ax_i + by_i + c \quad (3.3)$$

Soit l'erreur  $e_i$  qui représente le résidu défini par :

$$e_i = |f_{x_i, y_i} - z_i| \quad (3.4)$$

Le principe des moindres carrés consiste à choisir les valeurs des trois paramètres  $a$ ,  $b$  et  $c$  qui minimisent l'équation suivante :

$$S(a, b, c) = \sum_{i=1}^m e_i^2 = \sum_{i=1}^m (ax_i + by_i + c - z_i)^2 \quad (3.5)$$

où :

$$\frac{\partial S}{\partial a}(a, b, c) = 0 \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial S}{\partial b}(a, b, c) = 0 \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial S}{\partial c}(a, b, c) = 0 \quad (3.8)$$

Alors le système s'écrit :

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m 2x_i(ax_i + by_i + c - z_i) = 0 \\ \sum_{i=1}^m 2y_i(ax_i + by_i + c - z_i) = 0 \\ \sum_{i=1}^m 2(ax_i + by_i + c - z_i) = 0 \end{cases} \quad (3.9)$$

Il faut donc résoudre le système d'équations pour estimer les paramètres de l'équation du plan  $(a, b, c)$  :

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m x_{k+1}^{\text{DEM},i} z_{k+1}^{\text{DEM},i} \\ \sum_{i=1}^m y_{k+1}^{\text{DEM},i} z_{k+1}^{\text{DEM},i} \\ \sum_{i=1}^m z_{k+1}^{\text{DEM},i} \end{bmatrix}}_C = \underbrace{\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m (x_{k+1}^{\text{DEM},i})^2 & \sum_{i=1}^m x_{k+1}^{\text{DEM},i} y_{k+1}^{\text{DEM},i} & \sum_{i=1}^m x_{k+1}^{\text{DEM},i} \\ \sum_{i=1}^m x_{k+1}^{\text{DEM},i} y_{k+1}^{\text{DEM},i} & \sum_{i=1}^m (y_{k+1}^{\text{DEM},i})^2 & \sum_{i=1}^m y_{k+1}^{\text{DEM},i} \\ \sum_{i=1}^m x_{k+1}^{\text{DEM},i} & \sum_{i=1}^m y_{k+1}^{\text{DEM},i} & m \end{bmatrix}}_A \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}}_B \quad (3.10)$$

alors :

$$B = A^{-1}.C \quad (3.11)$$

Puis, nous calculons l'élévation  $z$  de la mesure prédite selon l'équation suivante :

$$z = a.\hat{x}_{k+1/k+1}^{\text{DEM}} + b.\hat{y}_{k+1/k+1}^{\text{DEM}} + c \quad (3.12)$$

où

—  $(a, b, c)$  sont les paramètres de l'équation du plan calculée par la méthode des moindres carrés,

—  $\hat{x}_{k+1/k+1}^{\text{DEM}}$  et  $\hat{y}_{k+1/k+1}^{\text{DEM}}$  représente la position 2D de la mesure prédite  $M$ .



### 3.3 Equations de mesure

Dans cette nouvelle méthode de fusion de données, nous avons ajouté une étape de correction basée sur l'utilisation de la mesure de l'angle de tangage issu de la centrale inertielle. Il est à noter que le MNE ASTER V2 a été remplacé par le MNE commercial World 30 qui présente de meilleures précisions en élévation.

#### 3.3.1 Mesure de l'angle de tangage

Les mesures des angles d'attitude sont délivrées par le capteur ublox EVK-M8U. Les angles de roulis, lacet et tangage sont délivrés à une fréquence de 1Hz dans le repère NED. Les mesures sont notées par  $\mathcal{Z}_{k+1}^{\text{ATT}}$ . Dans notre méthode de fusion, nous utilisons l'angle de tangage  $\alpha_{k+1}$  exprimé dans le repère ENU qui sera ensuite utilisé dans le processus d'estimation des inclinaisons de segments routiers. La forme matricielle de la mesure s'écrit :

$$\mathcal{Z}_{k+1}^{\text{ATT}} = ( \alpha_{k+1} ) = h^{\text{ATT}}(X_{k+1}) + \mathcal{V}_{k+1}^{\text{ATT}} \quad (3.13)$$

où  $h^{\text{ATT}}$  est la fonction non-linéaire de mesure de l'angle de tangage, donnée par :

$$h^{\text{ATT}}(X_{k+1}) = \left( \arctan\left(\frac{v_{k+1}^z}{\sqrt{(v_{k+1}^x)^2 + (v_{k+1}^y)^2}}\right) \right) \quad (3.14)$$

–  $\mathcal{V}_{k+1}^{\text{ATT}} \sim \mathcal{N}(0, R_{k+1}^{\text{ATT}})$  est un bruit blanc gaussien de moyenne nulle et de matrice de covariance  $R_{k+1}^{\text{ATT}}$ , définie par :

$$R_{k+1}^{\text{ATT}} = ( \sigma_\alpha^2 ) \quad (3.15)$$

#### 3.3.2 Mesure du modèle numérique d'élévation World 30

Afin d'améliorer l'estimation d'altitude du véhicule, nous avons remplacé le MNE ASTER par le MNE World 30 [63]. En dépit de leur non-gratuité, le but d'utilisation de ces données est de profiter de leur précision afin d'améliorer l'estimation des pentes des segments routiers.

Les deux modèles MNE ont la même résolution horizontale de 1 seconde d'arc (environ 30m), mais la précision verticale des mesures du modèle World 30 est souvent meilleure que celle du modèle ASTER : la matrice de variance d'erreur des données ASTER est d'environ 12,6m sur les mesures d'élévation, par contre elle se réduit à 6m pour le modèle World 30. Les coordonnées des données World 30 sont définies dans le référentiel WGS-84 et les élévations sont dans le référentiel EGM-96.

Le modèle numérique d'élévation World 30 NEXTMap est développé par la société Intermap Technologies. Il s'agit d'un modèle de données d'élévation

qui utilise des données publiques corrigées comme sources d'entrée [63, 126]. Ce modèle, qui n'est pas gratuit, fournit des données d'élévation précises de la surface terrestre avec une distance d'échantillonnage de 30m et une couverture mondiale [14]. Le modèle World 30 est une combinaison de données SRTM V2.1 dont la résolution spatiale est égale à 90m, de données ASTER GDEM2 et de données GTOPO30 dont la résolution est de 1km, qui ont toutes été contrôlées au sol [64]. Intermap applique un algorithme propriétaire lors de la fusion de cet ensemble de données pour produire le modèle World 30. L'approche comprend une série d'étapes visant à optimiser la précision du modèle. Elle fusionne les données SRTM avec les données ASTER GDEM, en maintenant la précision des données SRTM et en l'améliorant avec les meilleurs détails morphologiques des données ASTER GDEM2.

Les données de notre cadre expérimental nous ont été fournies gracieusement par Intermap Technologies. Les données  $\mathcal{Z}_{k+1}^{\text{DEM}}$  sont modélisées, comme dans le chapitre précédent, comme une équation de mesure dont la matrice de covariance de l'erreur  $R_{k+1}^{\text{DEM}}$  dépend de précision du modèle World 30.

## 3.4 Estimation des inclinaisons de segments routiers

L'estimateur proposé repose sur un filtre particulière qui intègre les mesures de la position GNSS, de l'accélération, de l'angle de tangage provenant du capteur EVK-M8U et des cartes numériques routière OSM et d'élévation World 30. L'objectif de cette fusion multi-capteurs est d'améliorer l'estimation de l'altitude et attitude du véhicule et celle des inclinaisons de segments routiers. Les étapes de la méthode proposée sont représentées par la figure 3.2.

### 3.4.1 Intégration de l'angle de tangage

Après l'intégration des mesures de positionnement et d'accélération, nous appliquons la correction par les mesures d'angle de tangage  $\mathcal{Z}_{k+1}^{\text{ATT}}$ . Dans cette étape, nous avons utilisé l'angle de tangage délivré par le capteur à instant  $k + 1$ . La pondération des particules consiste à corriger le poids par la mesure d'angle disponible, suivant la règle de Bayes :

$$w_{k+1}^i = \frac{P(\mathcal{Z}_{k+1} | X_{k+1}^i)}{\sum_{i=1}^N P(\mathcal{Z}_{k+1} | X_{k+1}^i)} w_k^i \quad (3.16)$$

La fonction de log-vraisemblance  $V_{(\mathcal{Z}_{k+1} | X_{k+1}^i)}$  s'écrit :

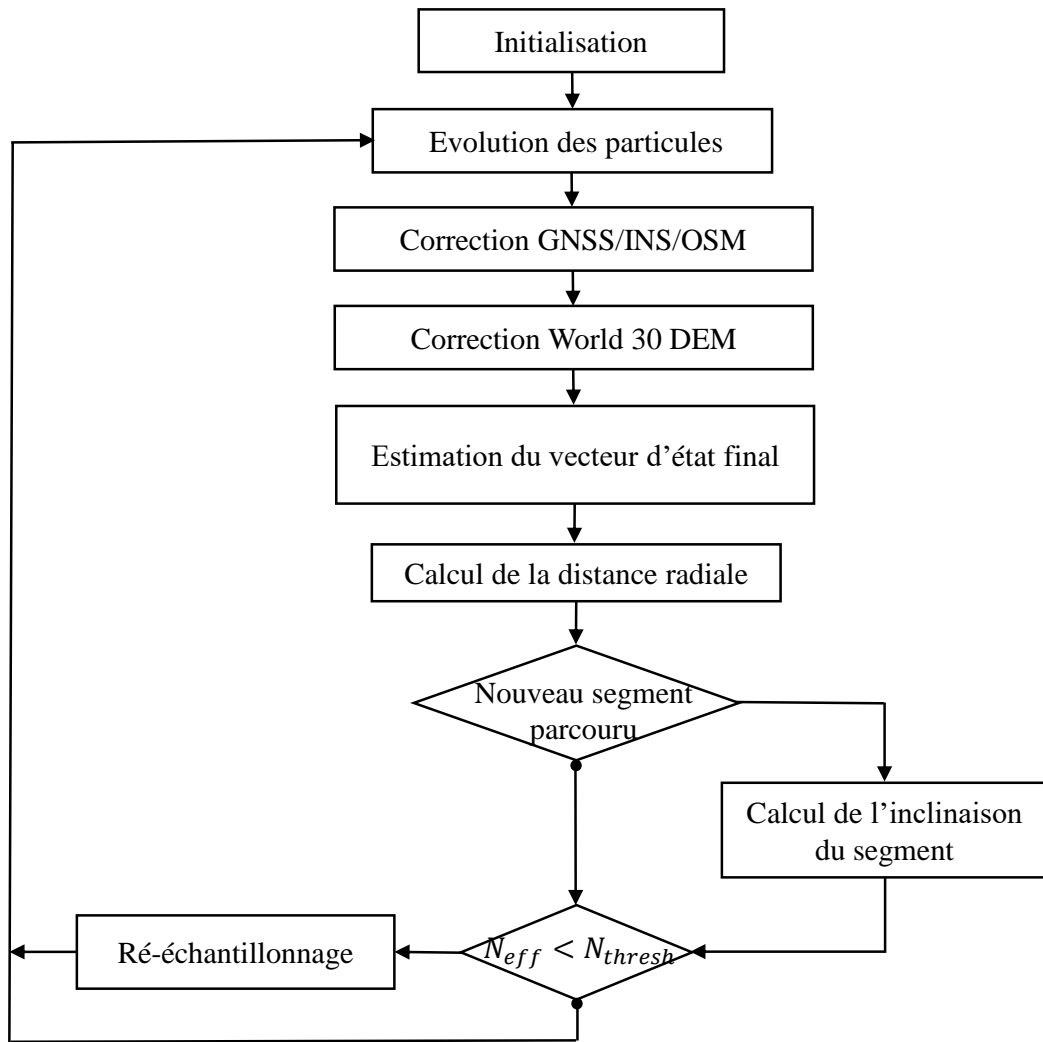


FIGURE 3.2 – Structure de fusion multi-capteurs

$$V_{(\mathcal{Z}_{k+1}|X_{k+1}^i)} \sim \ln(P(\mathcal{Z}_{k+1}|X_{k+1}^i)) \sim \|\mathcal{Z}_{k+1}^\mu - H^\mu X_{k+1}^i\|_{R^\mu}^2 \quad (3.17)$$

où  $\mu$  représente les mesures d'angle de tangage disponibles à l'instant  $k + 1$ .

### 3.4.2 Intégration des données du MNE World 30

La dernière étape consiste à fusionner l'estimation précédente avec les données d'élévation du modèle World 30. Après la correction GNSS/INS/OSM, le filtre utilise le segment routier identifié lors de la correction issue de l'étape de mise en correspondance cartographique avec les données OSM. La procédure est basée sur la sélection des données d'élévation World 30 par la méthode FGA. L'ensemble des points sélectionnés par cette fenêtre est présenté par l'équation 3.1.

Après avoir sélectionné ces points, nous avons calculé l'équation du plan moyen pour cet ensemble selon l'équation 3.3. L'équation pour le plan 3D est représentée comme suit :

$$z = a_{k+1/k+1} \cdot x + b_{k+1/k+1} \cdot y + c_{k+1/k+1} \quad (3.18)$$

La mesure World 30 prédite intermédiaire est calculée selon l'équation suivante :

$$\widehat{z}_{k+1/k+1}^{\text{DEM}} = \sum_{i=1}^N w_{k+1}^i h^{\text{DEM}}(X_{k+1}^i) \quad (3.19)$$

Alors, nous avons utilisé l'équation 3.18 pour calculer une estimation de la mesure d'élévation  $\widehat{z}_{k+1/k+1}^{\text{DEM}}$  sur ce plan :

$$z = a_{k+1/k+1} \cdot \widehat{x}_{k+1/k+1}^{\text{DEM}} + b_{k+1/k+1} \cdot \widehat{y}_{k+1/k+1}^{\text{DEM}} + c_{k+1/k+1} \quad (3.20)$$

Ensuite, les poids des particules sont calculés selon l'équation 3.16. Une fois la mesure d'altitude  $z$  recalculée, elle est utilisée dans la fonction de log-vraisemblance de l'équation 3.17.

Après cette série des corrections GNSS/INS/OSM/DEM, le vecteur d'état final, à l'instant  $k + 1$ , est calculé selon l'équation suivante :

$$\widehat{X}_{k+1} = \sum_{i=1}^N w_{k+1}^i X_k^i \quad (3.21)$$

Ensuite, une étape de ré-échantillonnage est déclenchée pour gérer l'ensemble des particules. Ce vecteur d'état final  $\widehat{X}_{k+1}$  est utilisé pour calculer les inclinaisons de pentes des segments routiers.

### 3.4.3 Calcul de la pente des segments de routes

L'objectif final de ce travail est d'enrichir la carte routière numérique OSM par les inclinaisons des routes parcourues par le véhicule [52]. Le calcul est réalisé après estimation du vecteur d'état final  $\hat{X}_{k+1}$ .

A chaque instant  $k+1$ , la distance radiale entre l'extrémité à l'origine du segment routier parcouru et la projection orthogonale de la position 3D au sol est calculée. L'application de la méthode FGA améliore l'estimation de l'inclinaison en créant un lien entre le segment routier complet et le relief associé. Lorsque le véhicule quitte le segment de route en cours et à condition de disposer d'au moins trois estimations d'altitude, l'application de la méthode des moindres carrés permet de calculer une estimation de l'angle d'inclinaison [28, 47]. Par conséquent, l'amélioration des précisions en estimation des altitudes, leur nombre et la longueur du segment routier ont un impact sur la qualité de l'estimation de la pente.

## 3.5 Contexte expérimental

Dans cette section, nous présentons les résultats expérimentaux obtenus à partir de données réelles, l'objectif étant de délivrer une estimation des pentes des routes parcourues dans une zone du réseau routier OSM, identique au contexte expérimental présenté dans le chapitre précédent.

Nous avons ajouté les mesures de l'angle de tangage fournies par le capteur EVK-M8U à la fréquence de 1 Hz et nous avons remplacé le modèle ASTER GDEM par le modèle d'élévation World 30 qui est composé d'une grille de points d'élévation dont la résolution horizontale est d'une seconde d'arc.

Dans la première partie, une comparaison entre les résultats d'estimation en altitude obtenus à partir des MNE ASTER/World 30 est présentée. Nous détaillons également les résultats de l'estimation de la position et du mouvement 3D du véhicule. Dans la deuxième partie, les résultats de l'estimation des pentes des segments de route obtenus par notre méthode sont détaillés.

### 3.5.1 Estimation du mouvement et de la position du véhicule

L'objectif de cette gestion des données d'élévation du modèle World 30 est d'améliorer l'estimation de l'altitude MSL du véhicule. L'approche proposée fusionne les altitudes mesurées par le système GNSS avec les mesures construites par la méthode FGA pour affiner l'estimation de l'altitude du véhicule. Les profils d'élévation des mesures GNSS/FGA, comparés dans la figure 3.3, présentent la même variabilité : les différences d'élévation s'expliquent d'une part par la locali-

sation de l'antenne GPS sur le toit du véhicule et d'autre part par la hauteur du tablier de la route, généralement surélevé par rapport au terrain avoisinant mesuré dans le MNE.

En conséquence, ils montrent l'efficacité de la méthode FGA à détecter la variation d'élévation lors du changement de segments routiers et la présence de pentes ascendantes/descendantes. L'intégration de cette mesure FGA dans la méthode de fusion va nous permettre d'affiner l'estimation des inclinaisons des routes.

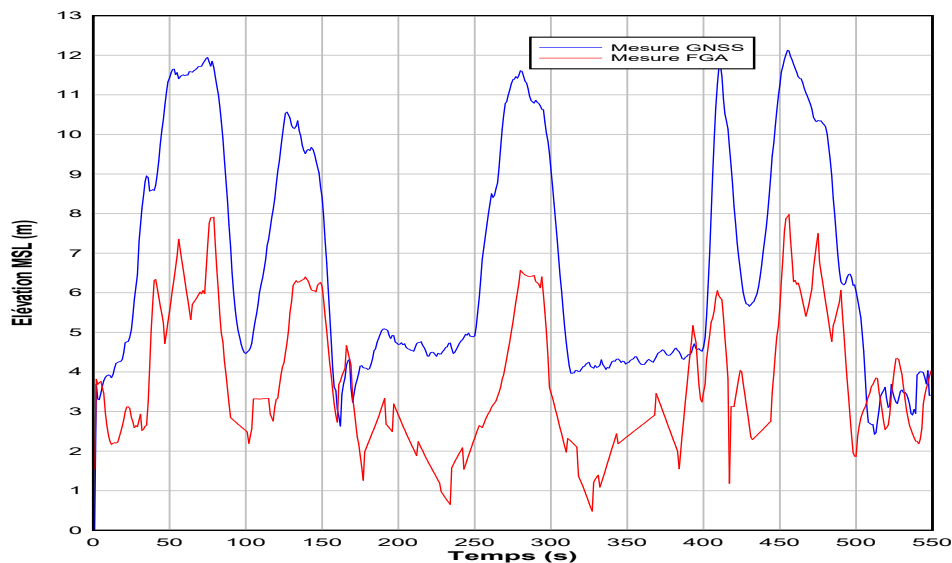


FIGURE 3.3 – Profils d'élévation GNSS/FGA

La comparaison des résultats de l'estimation d'altitude obtenus par le filtre particulaire intégrant les corrections successives GNSS/ACC/OSM/ASTER et ceux du filtre particulaire intégrant les corrections GNSS/INS/OSM/World 30 est représentée dans la figure 3.4. Nous avons également présenté le numéro des segments de route OSM empruntés par le véhicule durant l'expérimentation (tracés en carrés noirs).

Le véhicule a emprunté des échangeurs qui présentent des pentes ascendantes ou descendantes. La méthode FGA utilisant le MNE World 30 présente des variations d'altitude plus proches de la référence que le MNE ASTER. Les statistiques d'erreur donnent un écart-type d'environ 30cm pour l'altitude MSL estimée en utilisant les données World 30 au lieu de 60 cm avec les données ASTER. Cette amélioration de l'estimation d'élévation influe également sur l'estimation générale de la position 3D.

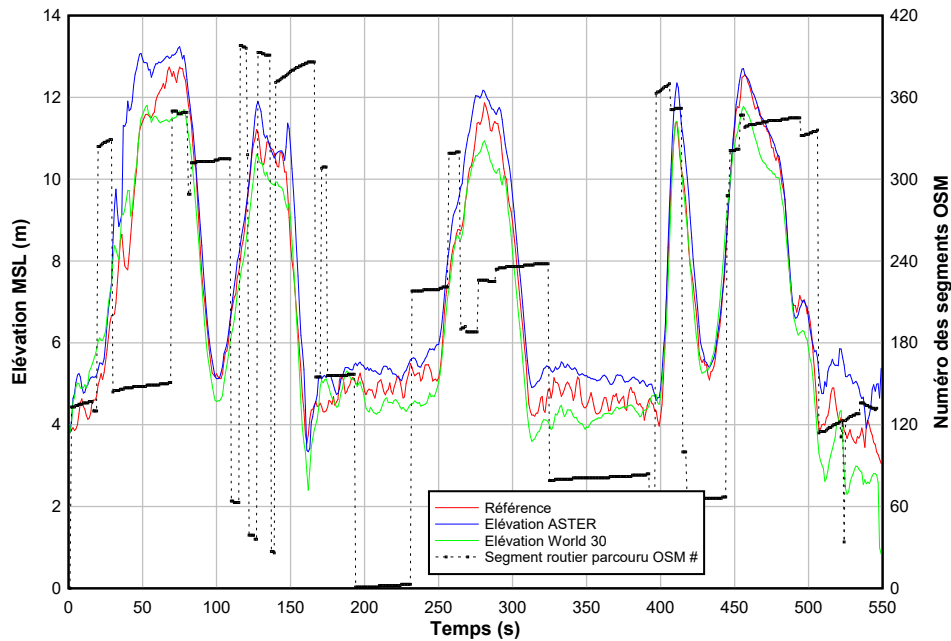


FIGURE 3.4 – Comparaison de l’estimation des altitudes ASTER/World 30

La figure 3.5 montre respectivement les résultats de l’estimation de l’accélération, de la vitesse et de l’erreur de la position 3D du véhicule. L’amélioration de l’estimation de la position influe directement l’estimation de l’accélération et de la vitesse 3D.

### 3.5.2 Estimation de la pente du segment routier

L’objectif principal de ce travail est d’estimer les inclinaisons des routes parcourues par le véhicule. Pour estimer la pente de la route, la méthode requiert d’une part la position estimée du véhicule et l’identification du segment parcouru dans la base de données cartographiques OSM. Comme détaillé dans la section 3.4.3, le segment routier doit être parcouru pendant au moins deux instants d’estimation (compatibles avec la fréquence de mesure GNSS) afin que nous puissions estimer son inclinaison. Pour améliorer l’estimation, le nombre minimal de relevés GNSS nécessaires est fixé à quatre instants consécutifs.

La figure 3.6 présente les résultats de l’estimation des inclinaisons (en pourcentage) des segments routiers parcourus. En fonction de nos conditions expérimentales basées sur un véhicule inséré dans le trafic routier, environ la moitié des

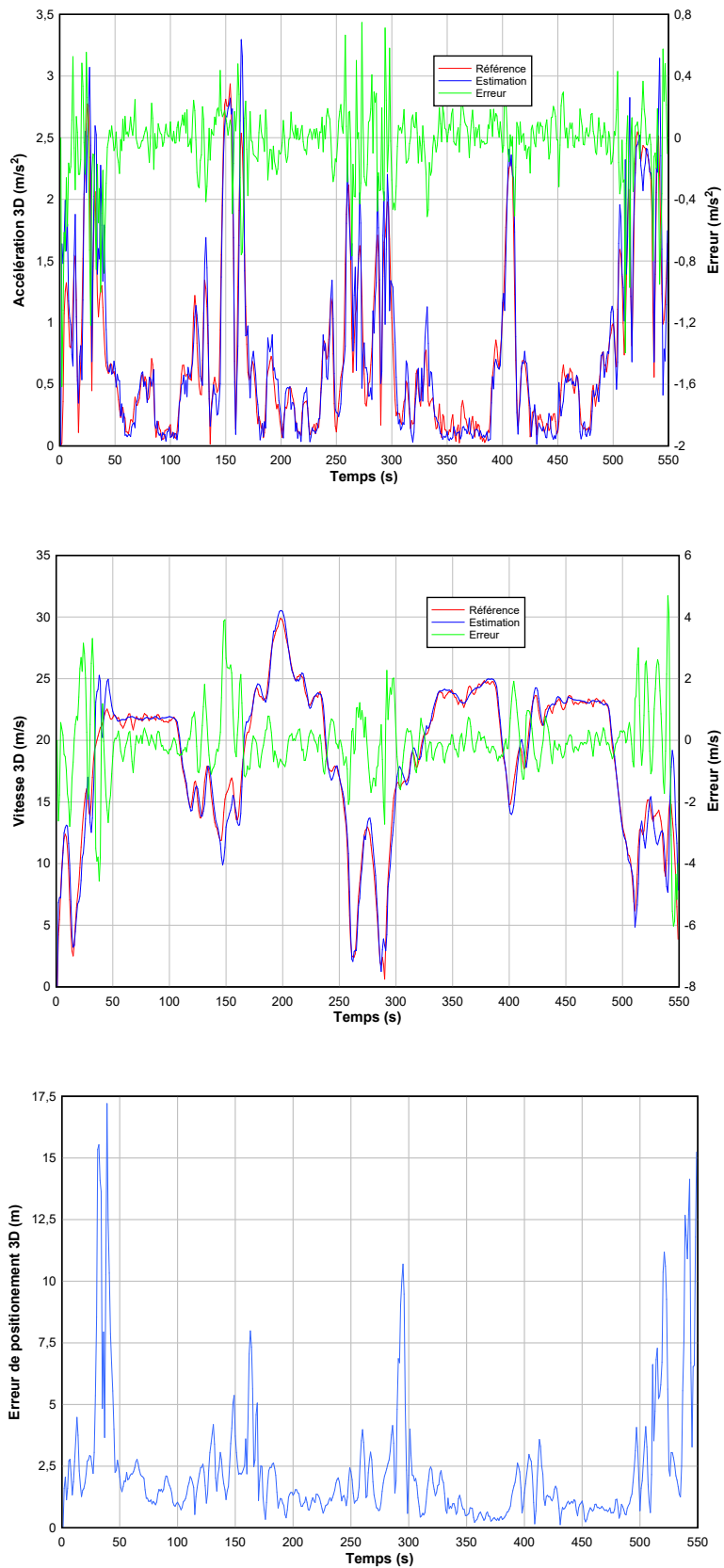


FIGURE 3.5 – Paramètres estimés de mouvement et de position



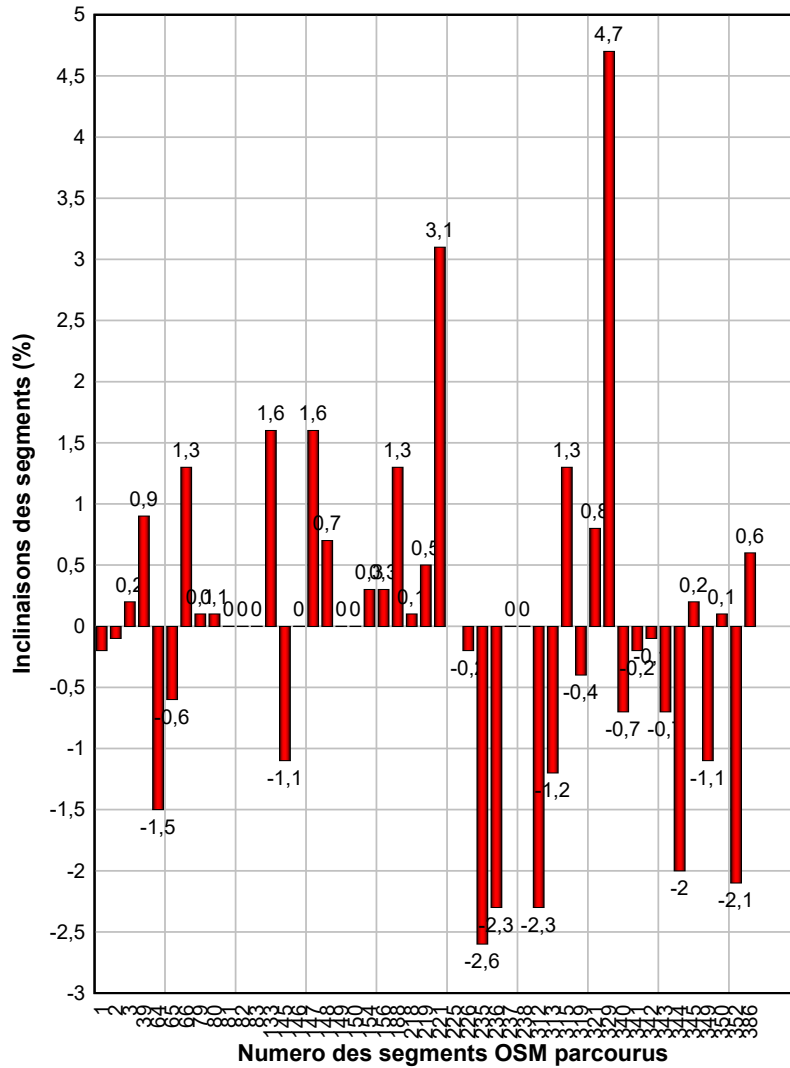


FIGURE 3.6 – Estimation de l’inclinaison des segments OSM parcourus

segments de routes parcourues ont pu bénéficier d’une estimation de leur pente. Parmi ceux-ci, environ un-tiers présentent une estimation de pente quasi-nulle en adéquation avec la topologie de l’environnement routier (voir tableau 3.1).

Les résultats montrent l’efficacité de notre méthode d’estimation des pentes de segments malgré les variations topologiques de la route. Le tableau 3.1 doit être mis en relation avec la figure 3.4 présentant les segments parcourus

TABLE 3.1 – Pentés estimées

N <sup>o</sup> du segment	Instants de mesure	Pente en %	N <sup>o</sup> du segment	Instants de mesure	Pente en %
<b>1</b>	16	-0.2	<b>219</b>	11	0.5
<b>2</b>	15	-0.1	<b>221</b>	5	3.1
<b>3</b>	7	0.2	<b>226</b>	7	-0.2
<b>39</b>	4	0.9	<b>235</b>	5	-2.6
<b>64</b>	4	-1.5	<b>236</b>	12	-2.3
<b>65</b>	7	-0.6	<b>237</b>	7	0
<b>66</b>	13	1.3	<b>238</b>	10	0
<b>79</b>	4	0.1	<b>312</b>	4	-2.3
<b>80</b>	12	0.1	<b>313</b>	12	-1.2
<b>81</b>	25	0	<b>315</b>	10	1.3
<b>82</b>	15	0	<b>319</b>	4	-0.4
<b>83</b>	9	0	<b>321</b>	4	0.8
<b>133</b>	4	1.6	<b>329</b>	4	4.7
<b>145</b>	4	-1.1	<b>340</b>	5	-0.7
<b>147</b>	6	1.6	<b>341</b>	4	-0.2
<b>148</b>	9	0.7	<b>342</b>	4	-0.1
<b>149</b>	9	0	<b>343</b>	9	-0.7
<b>150</b>	6	0	<b>344</b>	5	-2
<b>154</b>	5	0.3	<b>345</b>	9	0.2
<b>156</b>	14	0.3	<b>349</b>	4	-1.1
<b>157</b>	5	0	<b>350</b>	4	0.1
<b>188</b>	8	1.3	<b>352</b>	4	-2.1
<b>218</b>	8	0.1	<b>386</b>	4	0.6

chronologiquement par le véhicule. On retrouve en particulier des variations de pentes plus prononcées aux entrées et sorties d'autoroute (comme par exemple le segment numéro 236 qui correspond au moment où le véhicule a emprunté une sortie d'autoroute).

Une des difficultés réside dans la capacité à disposer d'une réalité terrain précise. Cependant, notre méthode présente une modélisation efficace pour l'estimation des pentes, paramètres topologiques importants dans la planification d'itinéraires à partir de cartes routières numériques. Il est à noter que la précision de l'estimation dépend du nombre minimum d'altitudes pouvant être estimées durant la présence du véhicule sur le segment. D'un point de vue général, la longueur du segment de route, la vitesse du véhicule et la fréquence de mesure GPS sont les paramètres qui permettent de configurer dynamiquement le nombre minimum

d'altitudes requis pour estimer la pente.

## 3.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une méthode de gestion statistique des données d'un MNE afin d'estimer les inclinaisons de segments routiers. Nous avons proposé une méthode de sélection de données candidates du MNE, désignée par la méthode de fenêtre glissante (FGA). L'approche proposée permet de créer une corrélation spatio-temporelle entre les mesures GNSS et les relevés MNE, prenant ainsi en compte la topologie de la zone géographique concernée. Elle permet également d'intégrer tous types de MNE présentant des précisions d'élévation variables.

Cette méthode est testée en fusionnant les données du système GNSS, d'un capteur inertiel, d'un réseau routier OSM et d'un modèle d'élévation World 30 via un filtre particulière. L'intégration de l'étape de correction par l'angle de tangage améliore l'estimation des inclinaisons des segments routiers parcourus par le véhicule. La procédure de mise en correspondance cartographique OSM permet d'identifier les segments de routes parcourus et la méthode FGA conduit à affiner la précision des élévations MSL. Nous avons montré, par l'utilisation de données réelles, la capacité de notre méthode à estimer les inclinaisons des routes.

Cette méthode est conçue pour améliorer la collaboration entre les bases de données routières et d'élévation. Il devient donc possible d'enrichir automatiquement la base de données OSM par les pentes estimées des segments. Le paramètre d'inclinaison de la route présente des perspectives intéressantes pour améliorer la planification d'itinéraires et la gestion d'énergie pour les véhicules hybrides ou électriques. Il est également possible d'utiliser cette méthodologie pour la détection de nouveaux segments routiers et l'enrichissement de cartes [27].

# Conclusion générale et perspectives

Dans ce travail de thèse, nous nous intéressons à proposer une modélisation multi-capteurs dans le cadre de la navigation terrestre. L'objectif était dans un premier temps d'estimer le mouvement et la position du véhicule en se focalisant sur des paramètres importants de la planification d'itinéraires et de la navigation des véhicules et notamment ceux relatifs aux véhicules hybrides et électriques. Ces paramètres ont en particulier une influence directe sur la consommation d'énergie : c'est dans cette optique, que nous nous sommes focalisés sur l'estimation des pentes des segments routiers. Ainsi, cette modélisation nous aide à enrichir des cartes routières 2D par des informations d'inclinaison des segments avec l'objectif d'aboutir à la création de cartes 3D de navigation. Dans cette modélisation, nous avons utilisé un système de positionnement GNSS (GPS, EGNOS, GLONASS, etc.), une centrale inertielle et des cartes routières OSM et des modèles numériques d'élévation. Le système GNSS fournit un positionnement 3D du véhicule. Les mesures d'accélération et d'angle de tangage sont délivrées par le capteur inertielle qui est utilisé comme complément de localisation au système GNSS. La carte routière OSM est utilisée comme un capteur supplémentaire pour améliorer l'estimation de la position au sol du véhicule. Enfin, les MNE ASTER et World 30 sont utilisés pour améliorer l'estimation de l'altitude du véhicule.

Nous avons développé et validé une méthode de fusion centralisée basée sur une modélisation d'état à partir de mesures GNSS/INS provenant du capteur ublox EVK-M8U. Le système de mesure est également alimenté par des données cartographiques OSM et d'élévation ASTER/World 30. Certaines mesures sont modélisées par des équations présentant de fortes non-linéarités que nous avons choisies de traiter par filtrage particulière. La mise en correspondance cartographique avec les données routières est réalisée sur une base probabiliste. Nous avons utilisé un critère de minimisation basé sur le calcul de la distance de Mahalanobis qui intègre les erreurs inhérentes aux bases de données cartographiques routières qui sont ici modélisées comme un capteur supplémentaire tout comme les MNE utilisés pour la correction d'altitude. Ces données sont exploitées via une approche TIN pour conduire à une reconstruction de l'altitude au voisinage de la position 3D du véhicule.

La finalité du dernier chapitre est de proposer une méthode d'estimation des inclinaisons des segments routiers de la base de données cartographiques, problématique importante dans les applications de planification d'itinéraires optimaux, notamment pour les véhicules à autonomie contrainte. Dans notre formalisme, nous avons intégré une étape supplémentaire visant à corriger avec l'angle de tangage de sorte à améliorer la précision en estimation du paramètre d'inclinaison. Ensuite, nous avons développé une nouvelle méthode de gestion du modèle d'élévation, désignée par « méthode de la Fenêtre Glissante Adjacente » (FGA). Cette méthode a pour but de limiter l'impact des artefacts présents dans les MNE et d'intégrer de manière optimale le relief au voisinage de la route. La méthode consiste à identifier l'ensemble des points d'élévation entourant le segment de route qui seront intégrés à l'estimation de sa pente. La précision en élévation du MNE World 30 a permis d'accroître les performances en estimation du paramètre d'inclinaison comme en attestent les premiers résultats affichés dans ce chapitre.

Les travaux réalisés dans ce mémoire ouvrent plusieurs perspectives dans le domaine de navigation. Ce travail montre la possibilité d'enrichir les cartes de navigation 2D en ajoutant des informations sur l'inclinaison des routes. L'approche développée est suffisamment générique pour permettre d'intégrer tout type de bases de données et pour les applications à faible coût des données libres de droits (OSM, ASTER, SRTM, etc). Ces cartes enrichies ouvrent également de nombreuses perspectives pour les concepteurs d'applications d'optimisation d'itinéraires, en intégrant notamment des considérations environnementales en termes de limitation des consommations et d'émission de gaz à effet de serre [54, 11]. Elles sont encore utilisées dans le développement des stratégies de contrôle optimal pour les véhicules électriques ou hybrides, et pour les applications nécessitant une connaissance prévisionnelle des informations topologiques pour l'aide à la conduite avec pour objectif final l'amélioration de la sécurité routière.

# Annexe A

## Représentation de l'attitude d'un véhicule

Dans la littérature, l'attitude d'un corps rigide dans l'espace est représentée par plusieurs méthodes. Les trois méthodes de représentation les plus couramment utilisées sont : la matrice de rotation, les angles d'Euler (AE) et de Cardan (AC) et les quaternions [127]. Chacune de ces méthodes présentent des avantages et des inconvénients. Dans le cas des applications qui nous concernent, nous avons utilisé la matrice de rotation pour établir la transformation des accélérations du repère mobile au repère de navigation. Dans ce contexte, nous définissons deux systèmes de coordonnées : repère mobile  $B$  et repère fixe  $NED$ , comme présentés dans la figure A.1.

Le repère mobile  $B$  est composé de trois vecteurs orthogonaux  $(\vec{x}_B, \vec{y}_B, \vec{z}_B)$  où l'origine  $O$  coïncide avec le centre de gravité du véhicule. Ces trois vecteurs représentent un système de coordonnées fixe du corps rigide. Par contre, le repère fixe  $NED$  représente le système de navigation. Dans les systèmes de navigation, le repère de référence le plus utilisé est le système  $NED$  (North, East, Down). Ce système est défini dans le plan tangent à la surface de la terre. Les vecteurs  $(\vec{x}_N, \vec{y}_E, \vec{z}_D)$  coïncident avec les trois directions de Nord, Est et la pesanteur.

### A.1 Matrice de rotation

Selon le théorème d'Euler, chaque changement d'orientation entre deux systèmes de coordonnées peut être produit par une simple rotation autour d'un axe de rotation dont l'orientation reste inchangée par rapport aux deux systèmes de coordonnées. En géométrie, cette rotation présente un angle entre les axes de deux systèmes et elle peut être présentée par une matrice de rotation, notée  $R$  [39].

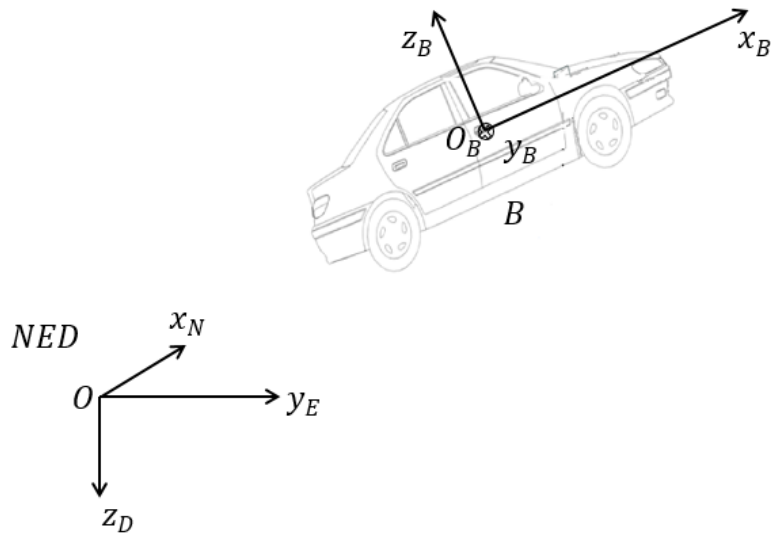


FIGURE A.1 – Représentation des repères

D'autres appellations sont données à cette matrice, comme matrice de cosinus directeurs (DCM), matrice de passage et matrice d'attitude. La matrice de rotation appartient au sous-espace des matrices orthogonales carrées, de dimension  $3 \times 3$ . La matrice de rotation permet de transformer les coordonnées  $X_1$  d'un vecteur, exprimées dans un repère  $A$ , en coordonnées  $X_2$ , exprimées dans un autre repère  $B$ .  $X_1$  et  $X_2$  sont liées par une transformation linéaire comme ci-dessous :

$$X_2 = RX_1 \quad (\text{A.1})$$

où :

- $X_1$  représente le vecteur  $X$  dans le repère  $A$ ,
- $X_2$  représente le vecteur  $X$  dans le repère  $B$ ,
- $R$  représente la matrice de la transformation du repère  $A$  vers le repère  $B$ .

$$R = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{pmatrix}$$

où  $R_{ij}$  est un cosinus directeur et l'on a les propriétés suivantes :

$$\begin{cases} R \mid R \in \mathbb{R}^{3 \times 3} \\ RR^T = I_3 \\ \det(R) = 1 \end{cases}$$

## A.2 Angles d'Euler (AE) et de Cardan (AC)

L'attitude d'un corps rigide peut être simplement représenté dans l'espace 3D à l'aide des angles d'Euler. Les angles de Cardan sont plus utilisés dans la robotique et l'aéronautique. Dans certains cas les deux groupes d'angles d'Euler et de Cardan sont confondus [39, 87]. En général, le passage d'un repère à un autre peut être décrit à l'aide d'une succession de trois rotations élémentaires  $R_1$ ,  $R_2$  et  $R_3$  autour des trois axes du repère. Il existe 12 combinaisons de ces trois rotations, elles sont divisées en deux groupes : groupe des suites symétriques et groupe des suites antisymétriques :

- les suites symétriques sont : ZXZ, XZX, XYX, ZYZ, YXY, YZY ;
- les suites antisymétriques sont : ZXY, ZYX, XYZ, XZY, YXZ, YZX.

Les deux suites les plus utilisées sont ZXZ et ZYX. Dans notre cas, nous utilisons la suite ZYX.

**Rotation ZYX** : c'est une suite de rotation qui utilise les trois angles d'attitude, notés par  $(\theta, \phi, \psi)$ , connus par les angles de Cardan ou les angles nautiques. L'angle  $\theta$  est l'angle de tangage,  $\phi$  est l'angle de roulis et  $\psi$  est l'angle de lacet. La figure A.2 présente ces trois angles.

Trois rotations permettent le passage d'un système de coordonnées  $NED = (x_N, y_E, z_D)$  vers un autre système de coordonnées  $B = (x_B, y_B, z_B)$ . Elles sont définies comme suite :

- $R_1$  : la première rotation d'un angle de lacet  $\psi$ , autour de l'axe  $z_D$ . L'angle  $\psi$  appartient à l'intervalle  $[-\pi, \pi]$ . Cette rotation permet de passer d'un repère  $NED (x_N, y_E, z_D)$  à un repère intermédiaire  $I (x', y', z' = z_D)$ . Le repère  $I$  est présenté en couleur rouge dans la figure A.2. Cette rotation est représentée par la matrice  $C_Z$  :

$$C_Z = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & \sin(\psi) & 0 \\ -\sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- $R_2$  : la deuxième rotation d'un angle de tangage  $\theta$  autour de l'axe  $y'$ . L'angle  $\theta$  appartient à l'intervalle  $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ . Cette deuxième rotation permet de passer du repère  $I (x', y', z')$  à un repère intermédiaire



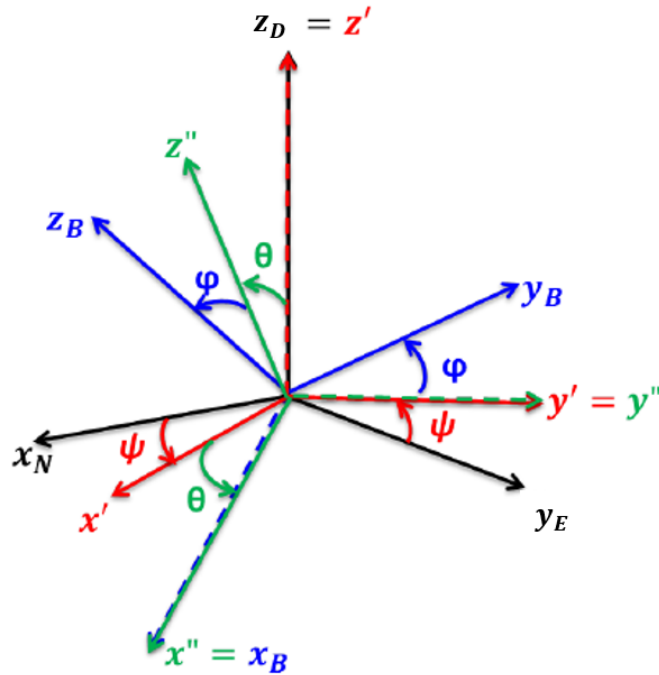


FIGURE A.2 – Rotations selon les angles d'Euler [87]

$I_2(x'', y'' = y', z'')$ . Le repère  $I_2$  est indiqué en couleur vert dans la figure A.2. La forme matricielle de cette matrice de rotation  $C_Y$  est donnée par :

$$C_Y = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

- $R_3$  : la dernière rotation effectuée d'un angle de roulis  $\phi$  autour de l'axe  $x''$ . L'angle  $\phi$  appartient à l'intervalle  $[-\pi, \pi]$ . Cette dernière rotation permet de passer du repère  $I_2(x'', y'', z'')$  au repère final  $B$  ( $x_B = x'', y_B, z_B$ ). Le repère  $B$  est présenté en couleur bleu dans la figure A.2. La matrice  $C_X$  a la forme matricielle suivante :

$$C_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & \sin(\phi) \\ 0 & -\sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix}$$

Les trois angles d'Euler d'un véhicule sont présentés sur la figure A.3.

La matrice de rotation globale  $C_{NED}^B$  permettant de regrouper ces trois rotations décrivant le passage du système de coordonnées  $NED$  au système de coordonnées  $B$  s'écrit [6] :

$$\begin{aligned}
C_{NED}^B &= C_X C_Y C_Z \\
&= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & \sin(\phi) \\ 0 & -\sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\psi) & \sin(\psi) & 0 \\ -\sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \cos(\theta)\cos(\psi) & \cos(\theta)\sin(\psi) & -\sin(\theta) \\ \sin(\phi)\sin(\theta)\cos(\psi) - \cos(\phi)\sin(\psi) & \sin(\phi)\sin(\theta)\sin(\psi) + \cos(\phi)\cos(\psi) & \sin(\phi)\cos(\theta) \\ \cos(\phi)\sin(\theta)\cos(\psi) + \sin(\phi)\sin(\psi) & \cos(\phi)\sin(\theta)\sin(\psi) - \sin(\phi)\cos(\psi) & \cos(\phi)\cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})
\end{aligned}$$

avec :

- $C_{NED}^B$  est la matrice de rotation permettant de passer du repère de navigation  $NED$  au repère mobile  $B$ ,
- $\phi$  est angle de roulis  $\in [-\pi, \pi]$ ,
- $\psi$  est angle de lacet  $\in [-\pi, \pi]$ ,
- $\theta$  est angle de tangage  $\in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ .

La vitesse angulaire d'un corps dans le système  $B$  par rapport au système  $NED$  est notée par  $\vec{\omega} = [w_x \ w_y \ w_z]^T$ . Cette vitesse est liée aux angles d'attitude par :

$$\begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \tan \theta \sin \phi & \tan \theta \cos \phi \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \frac{\sin \phi}{\cos \theta} & \frac{\cos \phi}{\cos \theta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} \quad (\text{A.3})$$

### A.3 Quaternions

Les quaternions sont l'une des représentations mathématiques de l'attitude d'un corps rigide, la plus utilisée dans la littérature [91]. Ils ont été inventés par Sir William Rowan Hamilton en 1848 dans le but de réduire le coût et la complexité de calcul. Les quaternions sont une solution alternative au théorème d'Euler. Les propriétés mathématiques des quaternions sont utilisées dans les rotations, les transformations et le suivi de l'attitude. Le quaternion unitaire est composé de deux éléments :

- un vecteur unitaire  $\vec{u}$ , qui est nommé encore axe d'Euler,
- un angle de rotation  $\theta$  autour de l'axe d'Euler  $\vec{u}$ .

Le quaternion est présenté par :

$$q = \begin{bmatrix} \cos(\frac{\theta}{2}) \\ \sin(\frac{\theta}{2}) \cdot \vec{u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_0 \\ \vec{q} \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

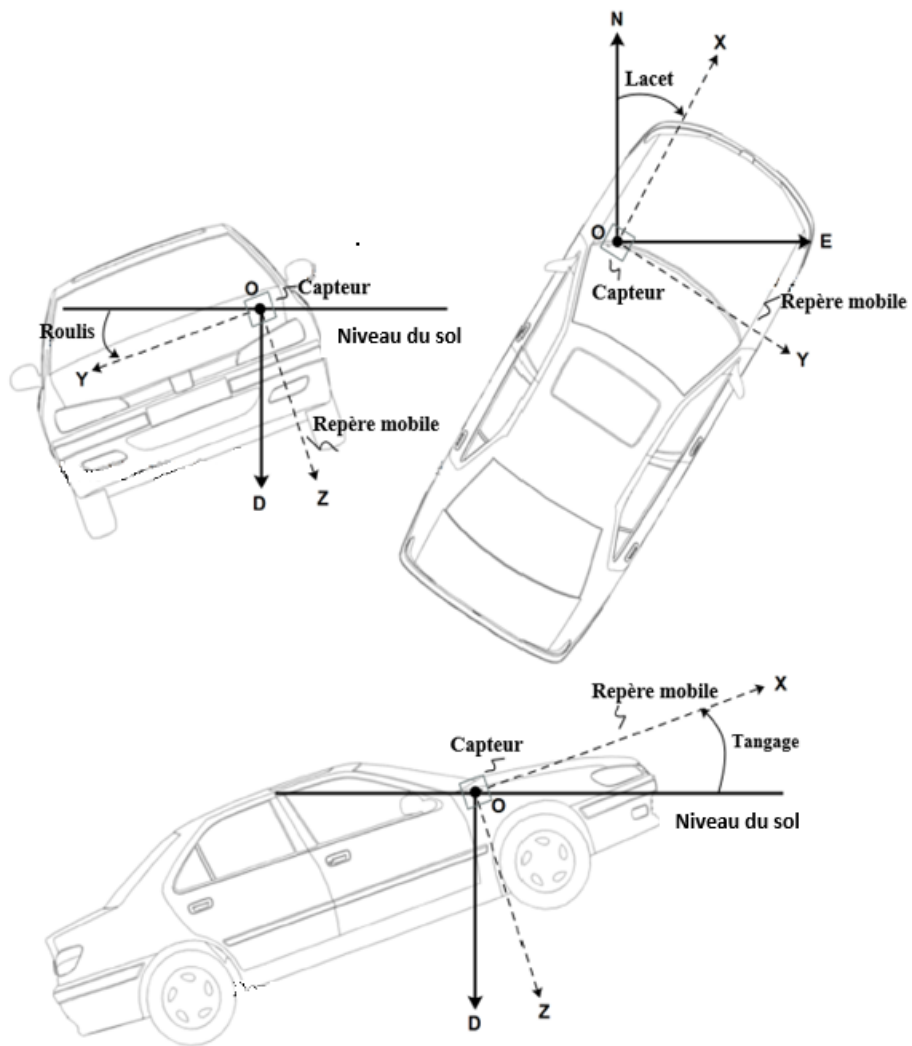


FIGURE A.3 – Attitude d'un véhicule [6]

avec :

- $\|\vec{u}\|=1$ .
- $q^0$  est un nombre réel  $\in \mathbb{R}$ , représente la partie scalaire (ou partie réelle),
- $\vec{q}_v = [q_1 \ q_2 \ q_3]^T \in \mathbb{R}^3$ , représente la partie vectorielle (ou partie imaginaire).

Donc, les quaternions unitaires appartiennent à l'espace vectoriel suivant :

$$\mathbb{Q} = \left\{ q = [q_0 \ q_v^T]^T \in \mathbb{R} \times \mathbb{R}^3 \mid q_0^2 + q_v^T q_v = 1 \right\}$$

Le quaternion est divisé en deux parties, une partie scalaire et une partie vectorielle. Il est une représentation «axe et angle» de la rotation entre deux trames de coordonnées. La partie vectorielle du quaternion indique l'axe autour duquel l'objet est tourné tandis que la partie scalaire représente la magnitude de cette rotation. Ses propriétés sont les suivantes :

- si aucune rotation n'a pas été effectuée, alors l'angle  $\theta$  est nul. Le quaternion identité est défini par :

$$q_{id} = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

- le quaternion conjugué est donné par :

$$\bar{q} = [q^0 \quad -\vec{q}_v^T]^T$$

- le produit de deux quaternions quelconques  $q_m = [q_{m0} \ \vec{q}_{m,v}^T]^T$  et  $q_n = [q_{n0} \ \vec{q}_{n,v}^T]^T$  est égale par :

$$q_m \otimes q_n = \begin{bmatrix} q_{m0} & -\vec{q}_{m,v}^T \\ \vec{q}_{m,v} & q_{m0} I_3 + [\vec{q}_{m,v}^\times] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_{n0} \\ \vec{q}_{n,v} \end{bmatrix} \quad (\text{A.5})$$

avec  $I_3$  est la matrice identité  $3 \times 3$ , et  $[\vec{q}_{m,v}^\times]$  représente la matrice antisymétrique du vecteur  $q_{m,v}$  défini par :

$$[\vec{q}_{m,v}^\times] = \begin{bmatrix} 0 & -q_{m3} & q_{m2} \\ q_{m3} & 0 & -q_{m1} \\ -q_{m2} & q_{m1} & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

- la multiplication de deux quaternions n'est pas commutative.
- comme les quaternions sont unitaires, donc l'inverse du quaternion  $q$  vaut :

$$q^{-1} = \bar{q}$$

La rotation d'un vecteur  $B$  dans l'espace peut être effectuée à l'aide de la multiplication des quaternions. Supposant que les deux quaternions  $b_q$  et  $r_q$  sont associés aux deux vecteurs  $\vec{b}$  et  $\vec{r}$  exprimés par :

$$b_q = [0 \quad \vec{b}^T]^T \quad r_q = [0 \quad \vec{r}^T]^T$$

Les deux quaternions  $b_q$  et  $r_q$  sont liés par :

$$b_q = q \otimes r_q \otimes q^{-1} = q \otimes r_q \otimes \bar{q}$$

Les paramètres du quaternion peuvent être utilisés pour définir la matrice de rotation  $C_{NED}^B$ .

$$C_{NED}^B = C(q) = (q_0^2 - \vec{q}^T \vec{q}) I_3 + 2(\vec{q} \vec{q}^T - q_0 [\vec{q} \times]) \quad (\text{A.7})$$

avec

$$C(q) = \begin{pmatrix} 2(q_0^2 + q_1^2) - 1 & 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) \\ 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & 2(q_0^2 + q_2^2) - 1 & 2(q_0 q_1 + q_2 q_3) \\ 2(q_0 q_2 + q_1 q_3) & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) & 2(q_0^2 + q_3^2) - 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.8})$$

# Annexe B

## Environnement matériel et logiciel

Dans cette annexe, nous présentons le capteur u-blox EVK-M8U utilisé, dans notre travail de thèse, dans le cadre de la localisation d'un véhicule terrestre dans un milieu urbain. Ainsi, nous présentons le logiciel u-center qui est dédié pour configurer le récepteur et la méthode du traitement des données brutes acquises par ce type de capteur.

### B.1 Récepteur u-blox EVK-M8U

Le récepteur GNSS/INS utilisé dans ces travaux de thèse est le EVK-M8U qui est fabriqué par la société u-blox (voir figure B.1 ). Ce capteur est constitué du système d'acquisition satellitaire GNSS et d'un capteur inertiel IMU.

Le système d'acquisition satellitaire multi-GNSS pourra acquérir les données de plusieurs systèmes satellitaires en même temps et les utiliser pour déterminer le positionnement 3D du véhicule. Les principaux systèmes pris en charge par ce récepteur sont GPS, GLONASS, Galileo et BeiDou. En plus, les systèmes d'augmentation de performances complémentaires à ce capteur sont SBAS (EGNOS), QZSS et IMES. Ces systèmes délivrent en temps réel des corrections permettant d'accroître la précision de la position. Le principe de ces systèmes d'augmentation est que des stations au sol mesurent en continuité l'erreur et transmettent un signal de correction aux récepteurs. Durant notre acquisition, nous avons activé le système d'augmentation satellitaire de l'Europe EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) afin d'améliorer la performance du GNSS. Le récepteur GNSS fournit les positionnements sous la forme des coordonnées géographiques, la latitude, la longitude et l'altitude (HAE et MSL EGM84-30M-BL), horodaté selon le temps GPS. Nous avons utilisé le logiciel MSP-GEOTRANS3 pour convertir les données du position (latitude, longitude) vers le repère UTM-31 et l'altitude MSL vers le repère EGM96-15M-BL [2], celui référençant les élévations

du modèle ASTER V2.

Le capteur inertielle fournit des informations sur la dynamique du véhicule comme les vitesses angulaires et les accélérations 3D, horodaté par un compteur interne. Il fournit les vitesses angulaires sur les trois axes du repère inertielle, exprimés en degré/seconde. En même temps, il fournit les accélérations dans le même repère, exprimés en mètres/secondes<sup>2</sup>. Il calcule encore les angles d'attitude du mobile en utilisant les vitesses linéaires calculées d'après le filtrage de la position GNSS.

Le récepteur u-blox communique avec l'ordinateur via un port USB avec le protocole NMEA (National Marine & Electronics Association). Sa fréquence maximale d'enregistrement des observations est théoriquement de 100Hz.



FIGURE B.1 – Récepteur EVK-M8U avec son antenne

## B.2 Logiciel dédié au récepteur EVK-M8U : u-center

Le logiciel u-center permet de configurer tous les paramètres d'acquisition du capteur EVK-M8U comme la fréquence d'acquisition et les paramètres de sorties. Il permet encore d'activer ou désactiver le mode de fusion UDR. Durant l'acquisition, le capteur reçoit les données brutes et affiche les informations reçues sous forme de tableaux ou de graphes. La figure B.2 présente un exemple de fenêtre du logiciel.

L'utilisateur peut ainsi avoir accès à de nombreuses données comme la position, la vitesse, l'accélération, l'azimut, des informations sur la distribution des

satellites, la qualité du signal reçu ou l'écart de précision. Cette application offre la possibilité de recevoir directement les messages NMEA, d'exporter les données reçues vers d'autres programmes, de configurer le récepteur (période d'échantillonnage, observations, etc.).

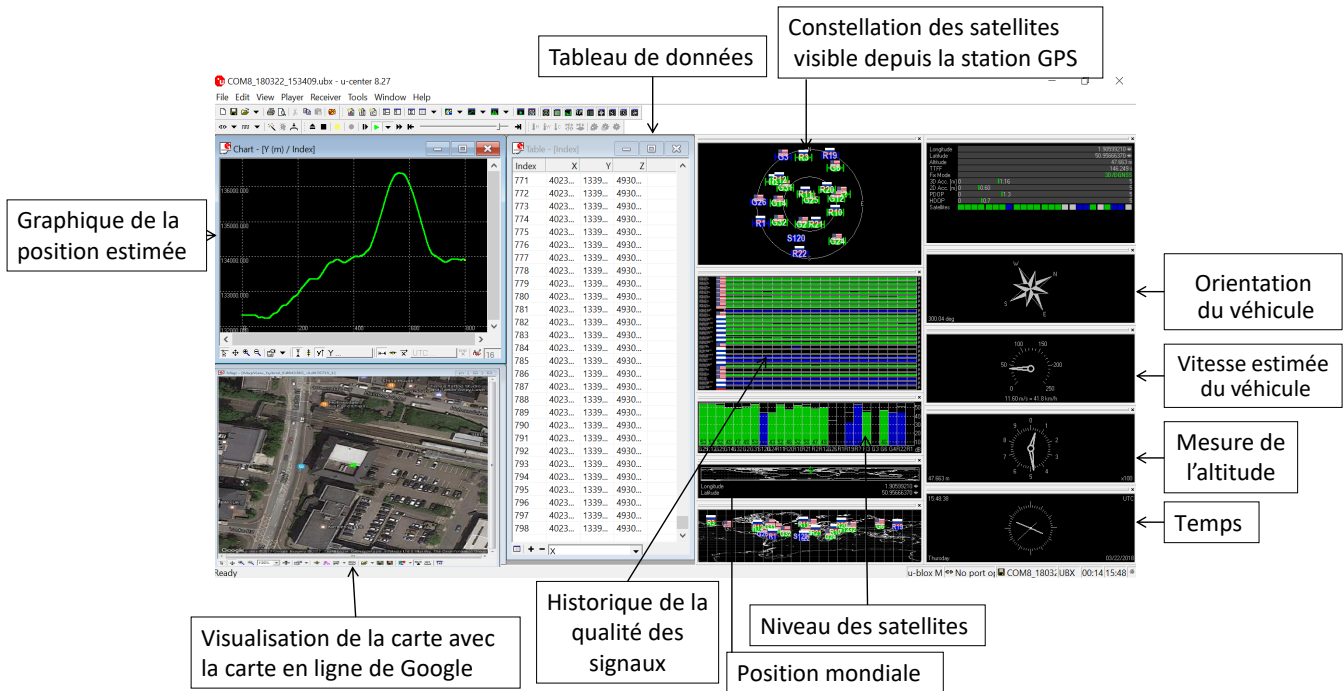


FIGURE B.2 – Fenêtre principale du logiciel u-center

Les données provenant de plusieurs récepteurs GNSS sont utilisées par le logiciel pour déterminer la position. À chaque acquisition GNSS, un filtrage de type Kalman est appliqué sur les données GNSS pour améliorer la précision de la position estimée.

### B.3 Traitement des données du récepteur u-blox EVK-M8U

Nous présentons dans cette section les données brutes fournies par le capteur u-blox EVK-M8U, la méthode d'extraction, de calibrage et de traitement des données brutes utilisées dans notre travail expérimental.



### B.3.1 Données brutes du récepteur u-blox EVK-M8U

Le capteur EVK-M8U stocke les données brutes dans un fichier linéaire, de format .ubx. Après la conversion de ce fichier à un format ASCII.log, les données seront stockées dans un fichier texte. Parmi toutes les données stockées, nous sommes intéressés par :

- la position : latitude, longitude et l’altitude MSL, à la fréquence de 1Hz,
- les accélérations selon les trois axes  $x_B$ ,  $y_B$  et  $z_B$ , à la fréquence de 1Hz,
- l’altitude totale (lacet, roulis, tangage) du véhicule, à la fréquence de 1Hz.

Les données de la position sont enregistrées dans le message NAV-PVT (Navigation Position Velocity Time Solution), selon la base temporelle du GPS, représentée par un indicateur du temps, nommée *TOW*. Par contre, les accélérations sont enregistrées dans le message ESF (External Sensor Fusion) selon la base temporelle du compteur du capteur, nommée *TTAG*. Ces données sont stockées selon deux formats, données à 100Hz et à 10Hz. Les données d’attitude sont trouvées dans le message NAV-ATT (Attitude Solution). Nous détaillons ci-dessous ces trois messages de données.

#### B.3.1.1 Message des données du positionnement

Comme nous l’avons déjà indiqué, les données de la position sont stockées dans le message NAV-PVT. La figure B.3 présente un exemple du message NAV-PVT au format ASCII et le tableau B.1 définit les paramètres de ce message.

Dans notre travail, nous avons transformé les mesures GNSS de la coordonnée géographique du système terrestre WGS-84 en coordonnées planes UTM en utilisant le logiciel MSP-GEOTRANS [2].

```
-----  
01 07 NAV-PVT    - 8C 3B : 8C 3B 100  
NAV-PVT 401678000      -8451 3  
    18833166  509502524      38091      -7563      971      1636  
        0        1        -10        1  18558394      115      237647  
    1.59 14  
TOW:401677.999991549  
3-D Fix  
LLH:    1.8833166    50.9502524    38.091    -7.563    45.654  
-----
```

FIGURE B.3 – Exemple du message NAV-PVT d’observation GNSS

TABLE B.1 – Description des paramètres du message NAV-PVT [6]

Paramètres	Description du message NAV-PVT	Unité
iTOW	Heure GPS de la semaine de l'époque de navigation.	<i>ms</i>
year	Année (UTC-Universel Temps Coordonné)	<i>y</i>
month	Mois, rang de 1 à 12 (UTC)	<i>mois</i>
day	Jour du mois, rang de 1 à 31 (UTC)	<i>d</i>
hour	Heur de jour, rang de 0 à 23 (UTC)	<i>h</i>
min	Minutes d'heure, rang de 0 à 59 (UTC)	<i>min</i>
sec	Secondes de minute, rang de 0 à 60 (UTC)	<i>s</i>
tAcc	Temps d'estimation de précision (UTC)	<i>ns</i>
nano	Fraction de seconde, gamme entre -1e9 à 1e9 (UTC)	<i>ns</i>
fixType	Type GNSSfix 0 : no fix 1 : INS seul 2 : 2D-fix 3 : 3D-fix 4 : GNSS + INS 5 : time only fix	-
numSV	Nombre de satellites utilisés dans la solution de navigation	-
lon	Longitude	<i>deg</i>
lat	Latitude	<i>deg</i>
height	Hauteur au-dessus de l'ellipsoïde	<i>mm</i>
hMSL	Hauteur au-dessus du niveau moyen de la mer	<i>mm</i>
hACC	Estimation de la précision horizontale	<i>mm</i>

### B.3.1.2 Message des données d'accélération

Le capteur inertiel divise les mesures d'accélération 3D sur deux messages ESF-RAW et ESF-MEAS. On peut considérer alors que les accélérations dans le message ESF-MEAS sont des accélérations à la fréquence de 10Hz. Les trois figures B.4, B.5 et B.6 illustrent un exemple de ces trois types des messages.

Le capteur mesure les données d'accélération à la fréquence de 99/100Hz, horodaté par un indicateur *TTAG* et *sTtag*. Après l'acquisition d'une trame de mesures des message ESF-RAW, il calcule une valeur moyenne de ces mesures et la sauvegarde dans le message ESF-MEAS. Le tableau B.2 définit les paramètres du message ESF.

Dans notre travail, nous avons utilisé les mesures d'accélération pour une fréquence de 1Hz. Nous avons appliqué une étape de calibrage et de transformation du repère mobile *B* au repère *NED* avant de les intégrer dans l'algorithme

de fusion.

```
-----  
10 03 ESF-RAW      - 03 DF : 03 DF 572  
ESF-RAW          346146 TTAG:   346.146  
  
16 Accelerometer X      FFFD7D      -0.628      8738081  
17 Accelerometer Y      000144       0.316      8738081  
18 Accelerometer Z      00273C       9.809      8738081  
14 Gyroscope X          00053E       0.328      8738081  
13 Gyroscope Y          FFF9A8      -0.396      8738081  
5 Gyroscope Z           000731       0.449      8738081  
12 Gyroscope Temp       00060B       15.47      8738081
```

FIGURE B.4 – Exemple du message ESF-RAW

```
-----  
10 02 ESF-MEAS    - D1 3D : D1 3D 36  
ESF-MEAS          346155 TTAG:   346.155 FLAGS:2018 ID:0000  
Time Mark Signal : None  
Time Mark Edge   : Rising  
calibTtagValid  
  
14 Gyroscope X      000556       0.333  
13 Gyroscope Y      FFF9C5      -0.389  
5 Gyroscope Z       000721       0.446  
12 Gyroscope Temp   000609       15.45  
  
346155    346.155 timetag   (Sensor Time Tag)  
346155    346.155 calibtTag (Receiver Time Tag)  
-----
```

FIGURE B.5 – Exemple du message ESF-MEAS

### B.3.1.3 Message des données d'attitude

Le message NAV-ATT indique l'attitude du véhicule sous forme de trois angles : roulis, tangage et lacet. Les valeurs des angles sont exprimées en degrés. La figure B.7 affiche un exemple du message NAV-ATT avec l'explication dans le tableau B.3. L'angle d'orientation (l'angle de lacet) est exprimé dans l'intervalle  $[0^\circ; 360^\circ]$  et les deux angles de tangage et roulis sont exprimés dans l'intervalle  $[-90^\circ; 90^\circ]$ .

```

-----
10 02 ESF-MEAS   - AC 7A : AC 7A 32
ESF-MEAS      346160 TTAG:   346.160 FLAGS:1818 ID:0000
Time Mark Signal : None
Time Mark Edge  : Rising
calibTtagValid

    16 Accelerometer X      FFFD76      -0.635
    17 Accelerometer Y      000142       0.314
    18 Accelerometer Z      002749       9.821

    346160    346.160 timetag  (Sensor Time Tag)
    346160    346.160 calibtTag (Receiver Time Tag)
-----

```

FIGURE B.6 – Exemple du message ESF-MEAS

```

-----
01 05 NAV-ATT   - 9D A9 : 9D A9 40
NAV-ATT 401678000 0
    271816   -6819019   18558394
    38143     38612     237647
TOW:401678.000
    2.71816   -68.19019   185.58394
-----

```

FIGURE B.7 – Exemple du message NAV-ATT

## B.4 Traitement des données d'accélération

Après l'extraction des mesures d'accélération brutes, nous avons besoin de calibrer les accélérations et les transformer dans le repère de navigation *NED* ensuite *ENU*. Nous présentons ci-dessous les différentes étapes du traitement de ces données.

L'accéléromètre est composé de trois axes suivants lesquels les accélérations sont mesurées. Les axes du capteur inertiel coïncident avec les axes du véhicule. L'axe  $x_B$  du capteur est avec la direction du déplacement du véhicule pointé vers l'avant. L'axe  $y_B$  est pointé vers la gauche et  $z_B$  vers le haut. Les accélérations enregistrées sont exprimées dans le repère mobile  $B$  du capteur et elles sont définies en  $m/s^2$ . Notre méthode de traitement des données d'accélération est composée de deux étapes :

- calibration des données d'accélération brutes,

TABLE B.2 – Description des paramètres du message ESF-RAW et ESF-MEAS

Paramètres	Description	Unité
TTAG	Étiquette de temps de mesure générée par le compteur du capteur pour le message MEAS	-
FLAGS	Indicateurs de type du message (1818, 2018)	-
sTtag	Compteur pour les messages RAW	-
16 Accelerometer X	mesure d'accélération sur l'axe de X	$m/s^2$
17 Accelerometer Y	mesure d'accélération sur l'axe de Y	$m/s^2$
18 Accelerometer Z	mesure d'accélération sur l'axe de Z	$m/s^2$
14 Gyroscope X	mesure de la vitesse angulaire sur l'axe de X	$deg/s$
15 Gyroscope Y	mesure de la vitesse angulaire sur l'axe de Y	$deg/s$
5 Gyroscope Z	mesure de la vitesse angulaire sur l'axe de Z	$deg/s$
12 Gyroscope Temp	température du gyroscope	degré Celsius

– transformation de l'accélération du repère mobile  $B$  au repère  $NED$  ensuite au repère  $ENU$ .

#### B.4.1 Calibrage des données brutes

Pour appliquer la transformation du repère UTM, nous devons avoir la même distribution d'axes. Dans notre cas, les deux axes  $y_B$  et  $z_B$  sont inversés. L'axe  $y_B$  est dirigé vers la gauche au lieu à droite et l'axe  $z_B$  est dirigé vers le haut plutôt que vers le bas. Alors, nous avons inversé ces deux axes pour aligner notre repère mobile avec celui présenté dans la figure B.8.

$$\begin{cases} \text{Accélérations}_{y_B}^i = -\text{Accélérations}_{y_B}^i \\ \text{Accélérations}_{z_B}^i = -\text{Accélérations}_{z_B}^i \end{cases}$$

#### B.4.2 Transformation d'accélération du repère mobile $B$ au repère de navigation $NED$

Après l'étape de calibrage, nous avons transformé les accélérations du repère  $B$  au repère  $NED$ . Nous avons utilisé la matrice de la transformation directe :

$$ACC_{NED} = C_B^{NED} ACC_B \quad (\text{B.1})$$

TABLE B.3 – Description des paramètres du message NAV-ATT

Paramètres	Description	Unité
iTOW	Heure GPS de la semaine de l'époque de navigation.	<i>ms</i>
roll	L'angle du roulis du véhicule.	<i>deg</i>
pitch	L'angle de pente du véhicule	<i>deg</i>
heading	L'orientation du véhicule	<i>deg</i>
accRoll	Précision du roulis du véhicule (si nul, l'angle de roulis n'est pas disponible).	<i>deg</i>
accPitch	Précision de pente du véhicule (si nul, l'angle de pente n'est pas disponible).	<i>deg</i>
accHeading	Précision d'orientation du véhicule (si nul, l'angle d'orientation n'est pas disponible).	<i>deg</i>

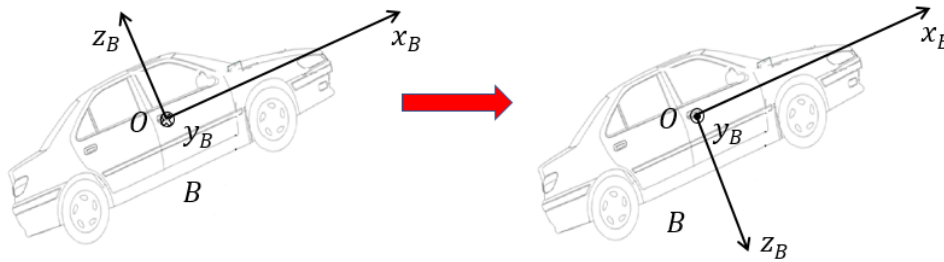


FIGURE B.8 – Présentation des deux repères

Dans la matrice  $C_B^{NED}$ , nous avons utilisé également les angles de tangage, lacet et roulis utilisés dans l'équation A.2.

# Bibliographie

- [1] [Figure] Tracking of satellites by using Phased Array Antenna - Scientific Figure on ResearchGate. <https://www.researchgate.net/GPS-constellation-fig1-281619903>.
- [2] "NGA : MSP GEOTRANS 3.7 Geographic Translator". <https://earth-info.nga.mil/GandG/geotrans>.
- [3] European Commission and European Space Agency. "Mission High Level Definition". *Tech Rept*, <http://europa.eu.int>, 2002.
- [4] "Interface and Control Document". *Tech Rept, Coordinational Scientific Information Center Russian Federation Ministry of Defense*, <http://www.glonass-center.ru>, Version 5, 2002.
- [5] "NEXTMap World 30<sup>TM</sup> Digital Surface Model". Technical Review. 2013.
- [6] "User Guide : u-blox 8 / u-blox EVK-M8U Receiver Description". Including Protocol Specification. <https://www.u-blox.com>, 2018.
- [7] "BD TOPO Version 2.2". Tech Rept, L'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN), Septembre 2017.
- [8] M. Aftatah, A. Lahrech, A. Abounada, and A. Soulhi. "GPS/INS/Odometer Data Fusion for Land Vehicle Localization in GPS Denied Environment". *Modern Applied Science*, 11(1) :62 – 65, 2016.
- [9] M. Alshawa. "*Contribution à la cartographie mobile : développement et caractérisation d'un système base sur un scanner laser terrestre*". PhD thesis, Strasbourg, 2009.
- [10] B. D. Anderson and J. B. Moore. "Optimal Filtering". *Englewood Cliffs*, 21 :22–95, 1979.
- [11] P. G. Anselma, Y. Huo, J. Roeleveld, G. Belingardi, and A. Emadi. "Slope-Weighted Energy-Based Rapid Control Analysis for Hybrid Electric Vehicles". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(5) :4458–4466, 2019.
- [12] D. Arabelos. "Intercomparisons of the global DTMs ETOPO5, TerrainBase and JGP95E". *Elsevier Physics and Chemistry of the Earth, Part A : Solid Earth and Geodesy*, 25(1) :89–93, 2000.

- [13] M. S. Arulampalam, S. Maskell, N. Gordon, and T. Clapp. "A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking". *IEEE Transactions on Signal Processing*, 50(2) :174–188, 2002.
- [14] I. D. Arungwa, E. O. Obarafo, and C. Okolie. "Validation of Global Digital Elevation Models in Lagos State, Nigeria". *Nigerian Journal of Environmental Sciences and Technology (NIJEST)*, 2(1) :78–88, 2018.
- [15] M. M. Atia, A. R. Hilal, C. Stellings, E. Hartwell, J. Toonstra, W. B. Miners, and O. A. Basir. "A Low-Cost Lane-Determination System Using GNSS/IMU Fusion and HMM-Based Multistage Map Matching". *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(11) :3027–3037, 2017.
- [16] F. Baouche. "*Outils pour l'optimisation de la consommation des véhicules électriques*". PhD thesis, Lyon, 2015.
- [17] Y. Bar-Shalom and X. R. Li. "Estimation and Tracking : Principles, Techniques and Software". *Artech House*, 1993.
- [18] N. Barbour, R. Hopkins, A. Kourepenis, and P. Ward. "Inertial MEMS system applications". *Defense Technical Information Center*, 2010.
- [19] N. M. Barbour. "Inertial Navigation Sensors". *Charles Stark Draper Lab Inc Cambridge MA, USA*, 2010.
- [20] J. P. Bartolomé, X. Maufroid, I. F. Hernández, J. A. L. Salcedo, and G. S. Granados. "Overview of GALILEO System". In *Springer GALILEO Positioning Technology*, pages 9–33. 2015.
- [21] J. Bennet. "OpenStreetMap". *Packt Publishing Limited, Ed*, 2010.
- [22] D. Bernstein and A. Kornhauser. "An introduction to Map Matching for Personal Navigation Assistants". 1998.
- [23] P. Bonnifait. "*Contribution à la localisation dynamique d'automobiles. Application à l'aide à la conduite*". PhD thesis, Université de Technologie de Compiègne, 2005.
- [24] P. P. Bonnifait. "*Localisation précise en position et attitude des robots mobiles d'extérieur à évolutions lentes*". PhD thesis, Nantes, 1997.
- [25] J. Borenstein and L. Feng. "Measurement and Correction of Systematic Odometry Errors in Mobile Robots". *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 12(6) :869–880, 1996.
- [26] B. Y. Boroujeni and H. C. Frey. "Road grade quantification based on global positioning system data obtained from real-world vehicle fuel use and emissions measurements". *Atmospheric Environment*, 85 :179–186, 2014.



- [27] C. Boucher and J.-C. Noyer. "Dual-GPS Fusion for Automatic Enhancement of Digital OSM Radmaps". In *IEEE First AESS European Conference on Satellite TELEcommunications (ESTEL)*, pages 1–6, 2012.
- [28] C. Boucher and J.-C. Noyer. "Automatic estimation of road inclinations by fusing GPS readings with OSM and ASTER GDEM2 data". *IEEE International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)*, pages 871–876, 2014.
- [29] C. Boucher and J.-C. Noyer. "A General Framework for 3-D Parameters Estimation of Roads Using GPS, OSM and DEM Data". *Sensors Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 18(1) :41 – 46, 2017.
- [30] G. Cai, B. M. Chen, and T. H. Lee. "Coordinate Systems and Transformations". In *Springer Unmanned Rotorcraft Systems*, pages 23–34, 2011.
- [31] G. Chappart and N. Reynard. "La carte topographique française de 1887 à nos jours". *Le Monde des cartes*, (191) :53–67, 2007.
- [32] J.-P. Chauveau. "*Application des méthodes de résolution d'ambiguïtés sur la mesure de phase GPS à l'approche de précision : Contributions méthodologiques et étude des phénomènes temporels*". PhD thesis, Atelier national de reproduction des thèses, 2002.
- [33] D. Chen, A. Driemel, L. J. Guibas, A. Nguyen, and C. Wenk. "Approximate Map Matching with respect to the Fréchet distance". In *Proceedings of the Meeting on Algorithm Engineering and Experiments*, pages 75–83, 2011.
- [34] B. Ciepluch, R. Jacob, P. Mooney, and A. C. Winstanley. "Comparison of the accuracy of OpenStreetMap for Ireland with Google Maps and Bing Maps". *Proceedings of the Ninth International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences 20-23rd*, pages 337–340, 2010.
- [35] G. Colosimo, M. Crespi, L. De Vendictis, and K. Jacobsen. "Accuracy evaluation of SRTM and ASTER DSMs". In *Proceedings of the 29th EARSeL Symposium, Chania, Greece*, 2009.
- [36] J. L. Davis, T. A. Herring, and I. I. Shapiro. "Effects of atmospheric modeling errors on determinations of baseline vectors from very long baseline interferometry". *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 96(B1) :643–650, 1991.
- [37] L. De Floriani and E. Puppo. "Hierarchical Triangulation for Multiresolution Surface Description". *ACM Transactions On Graphics (TOG)*, 14(4) :363–411, 1995.
- [38] P. Del Moral, J.-C. Noyer, G. Rigal, and G. Salut. "Traitement Non-linéaire du Signal Par Réseau Particulaire Application Radar". In *14ème Colloque sur le traitement du signal et des images*, 1993.

- [39] J. Diebel. "Representing Attitude : Euler Angles, Unit Quaternions, and Rotation Vectors". *Matrix*, 58(15-16) :1–35, 2006.
- [40] F. Dilssner, T. Springer, G. Gienger, and J. Dow. "The GLONASS-M satellite yaw-attitude model". *Advances in Space Research*, 47(1) :160–171, 2011.
- [41] R. Douc and O. Cappé. "Comparison of Resampling Schemes for Particle Filtering". In *IEEE Proceedings of the 4th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA)*, pages 64–69, 2005.
- [42] A. Doucet, N. D. Freitas, and N. Gordon. "*Sequential Monte Carlo Methods in Practice*". Springer, 2001.
- [43] C. J. Duncan B. "Integration of GPS with Inertial Navigation Systems". *Navigation*, 25(2) :236–245, 1978.
- [44] B. Efron and R. J. Tibshirani. "*An introduction to the Bootstrap*". CRC Press, 1994.
- [45] M. E. El Najjar and P. Bonnifait. "A Road-Matching Method for Precise Vehicle Localization Using Belief Theory and Kalman Filtering". *Autonomous Robots*, 19(2) :173–191, 2005.
- [46] T. G. Farr, P. A. Rosen, E. Caro, R. Crippen, R. Duren, S. Hensley, M. Kobrick, M. Paller, E. Rodriguez, L. Roth, et al. "The Shuttle Radar Topography Mission". *Reviews of Geophysics*, 45(2), 2007.
- [47] A. Fathi and J. Krumm. "Detecting Road Intersections from GPS Traces". In *Springer International Conference on Geographic Information Science*, pages 56–69, 2010.
- [48] B. J. Gamett. "*An accuracy assessment of Digital Elevation Data and subsequent hydrologic delineations in lower relief terrain*". PhD thesis, Idaho State University, USA, 2010.
- [49] J.-F. Girres and G. Touya. "Quality Assessment of The French OpenStreet-Map Dataset". *Transactions in GIS*, 14(4) :435–459, 2010.
- [50] N. J. Gordon, D. J. Salmond, and A. F. M. Smith. "Novel approach to nonlinear/non-Gaussian Bayesian state estimation". In *IEEE Radar and Signal Processing*, volume 140, pages 107–113, 1993.
- [51] M. S. Grewal, L. R. Weill, and A. P. Andrews. "*Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration*". John Wiley & Sons, 2007.
- [52] H. F. Grip, L. Imsland, T. A. Johansen, J. C. Kalkkuhl, and A. Suissa. "Estimation of Road Inclination and Bank Angle in Automotive Vehicles". In *IEEE American Control Conference (ACC'09)*, pages 426–432, 2009.
- [53] U. C. Guard. "NAVSTAR GPS user equipment introduction". *Journal of Navigation*, 1, 1996.

- [54] N. Guessouri. "Etude comparative entre influence des différent paramétriser physique et la performance du véhicule électrique modélisation et simulation". 2019.
- [55] M. Haklay and P. Weber. "OpenStreetMap : User-Generated Street Maps". *IEEE Computer SOC Pervas Comput*, 7(4) :12–18, 2008.
- [56] M. Hashemi and H. A. Karimi. "A Critical Review of Real-Time Map-Matching Algorithms : Current Issues and Future Directions". *Elsevier Computers, Environment and Urban Systems*, 48 :153–165, 2014.
- [57] K. Hayat, W. Puech, G. Gesquière, and M. Chaumont. "Visualisation 3D temps-réel à distance de MNT par insertion de données cachées basée ondelettes". In *CORESA : COmpression et REprésentation des Signaux Audio-visuels*, 2006.
- [58] C. Hirt, M. S. Filmer, and W. E. Featherstone. "Comparison and validation of the recent freely available ASTER-GDEM ver1, SRTM ver4. 1 and GEO-DATA DEM-9S ver3 Digital Elevation Models over Australia". *Australian Journal of Earth Sciences*, 57(3) :337–347, 2010.
- [59] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and J. Collins. *"Global Positioning System : theory and practice"*. Springer Science & Business Media, 1997.
- [60] J. Hol, T. Schon, and F. Gustafsson. "On Resampling Algorithms for Particle Filters". In *IEEE Nonlinear Statistical Signal Processing Workshop*, pages 79–82, 2006.
- [61] S. Hongwei, L. Zhigang, and P. Feng. "Development of satellite navigation in China". IEEE International Frequency Control Symposium with the 21st European Frequency and Time Forum, 2007.
- [62] S. R. Hosseinzadeh. "Drainage network analysis, comparis of digital elevation model (DEM) from ASTER with high resolution satellite image and areal photographs". *International Journal of Environmental Science and Development*, 2, 2011.
- [63] Intermap Technologies, Inc.® 8310 South Valley Highway, Suite 400 Englewood, CO 80112. Technical Review NEXTMap® World 30™ Digital Surface Model. 2013.
- [64] K. Jacobsen. "Performance of Large Area Covering Height Models". *European Remote Sensing*, pages 1–8, 2014.
- [65] C. Jing, A. Shortridge, S. Lin, and J. Wu. "Comparison and validation of SRTM and ASTER GDEM for a subtropical landscape in Southeastern China". *International Journal of Digital Earth*, 7(12) :969–992, 2014.
- [66] K. Jo, J. Kim, and M. Sunwoo. "Real-Time Road-Slope Estimation Based on Integration of Onboard Sensors with GPS using an IMM-PDA Filter". *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 14(4) :1718–1732, 2013.

- [67] R. E. Kalman. "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems". *Journal of Basic Engineering*, 82(1) :35–45, 1960.
- [68] E. Kaplan and C. Hegarty. "*Understanding GPS : Principles and Applications*". Artech House : Boston, MA, USA, 2005.
- [69] G. Katsigianni, S. Loyer, F. Perosanz, F. Mercier, R. Zajdel, and K. Sośnica. "Improving GALILEO orbit determination using zero-difference ambiguity fixing in a Multi-GNSS processing". *Elsevier Advances in Space Research*, 2018.
- [70] M. Kaul, B. Yang, and C. S. Jensen. "Building Accurate 3D Spatial Networks to Enable Next Generation Intelligent Transportation Systems". In *IEEE 14th International Conference on Mobile Data Management (MDM)*, volume 1, pages 137–146, 2013.
- [71] M. Kayton and W. R. Fried. "*Avionics Navigation Systems*". John Wiley & Sons, 1997.
- [72] J. S. Kim. "Node Based Map Matching Algorithm for Car Navigation System". In *International Symposium on Automotive Technology Automation. Global Deployment of Advanced Transportation Telematics (ITS)*, 1996.
- [73] S. Kim and J.-H. Kim. "Adaptive Fuzzy-network-based C-measure Map-Matching Algorithm for Car Navigation System". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 48(2) :432–441, 2001.
- [74] A. D. King. "Inertial Navigation-Forty Years of Evolution". *GEC Review*, 13(3) :140–149, 1998.
- [75] J. A. Klobuchar. "Design and characteristics of the GPS ionospheric time delay algorithm for single frequency users". In *PLANS'86-Position Location And Navigation Symposium*, pages 280–286, 1986.
- [76] M. Klomp, Y. Gao, and F. Bruzelius. "Longitudinal Velocity and Road Slope Estimation in Hybrid Electric Vehicles Employing Early Detection of Excessive Wheel Slip". *Vehicle System Dynamics*, 52(1) :172–188, 2014.
- [77] A. Kong, J. S. Liu, and W. H. Wong. "Sequential Imputations and Bayesian Missing Data Problems". *Journal of the American Statistical Association*, 89(425) :278–288, 1994.
- [78] A. Lahrech. "*Perception multi-capteurs pour la navigation par satellites en milieu urbain*". PhD thesis, Université Littoral Cote d'Opale ULCO, 2006.
- [79] N. Lambert. "OpenStreetMap – collaborer pour faire des cartes". <https://neocarto.hypotheses.org/91>, 2013.
- [80] S. Lee, K.-Y. Song, Y. Kim, and I. Park. "Regional groundwater productivity potential mapping using a geographic information system (GIS) based artificial neural network model". *Springer Hydrogeology Journal*, 20(8) :1511–1527, 2012.

- [81] L. Li, M. Quddus, and L. Zhao. "High accuracy tightly-coupled integrity monitoring algorithm for Map-Matching". *Elsevier Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 36 :13–26, 2013.
- [82] T. Li, M. Bolic, and P. M. Djuric. "Resampling Methods for Particle Filtering : Classification, Implementation, and Strategies". *IEEE Signal Processing Magazine*, 32(3) :70–86, 2015.
- [83] X. Liao, Q. Huang, D. Sun, W. Liu, and W. Han. "Real-time road slope estimation based on adaptive extended Kalman filter algorithm with in-vehicle data". In *IEEE 29th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, pages 6889–6894, 2017.
- [84] J. S. Liu and R. Chen. "Sequential Monte Carlo Methods for Synamic Systems". *Journal of the American Statistical Association*, 93(443) :1032–1044, 1998.
- [85] N. Magnusson and T. Odenman. "Improving absolute position estimates of an automotive vehicle using GPS in sensor fusion". Chalmers University of Technology, 2012.
- [86] P. C. Mahalanobis. "On the Generalized Distance in Statistics". *Springer Proceedings of the National Institute of Science of India*, 2(1) :49–55, 1936.
- [87] A. Makni. "*Fusion de données inertielles et magnétiques pour l'estimation de l'attitude sous contrainte énergétique d'un corps rigide accéléré*". PhD thesis, Université Grenoble Alpes, 2016.
- [88] A. A. Maranga. "*Techniques Mixtes de Positionnement et la navigation Véhiculaire*". PhD thesis, Université de Sherbrooke, 2015.
- [89] M. Maurice Fréchet. "Sur quelques points du calcul fonctionnel". *Springer Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo*, 22(1) :1–72, 1906.
- [90] T. Miwa, D. Kiuchi, T. Yamamoto, and T. Morikawa. "Development of map matching algorithm for low frequency probe data". *Elsevier Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 22 :132–145, 2012.
- [91] F. Monteghetti. "Quaternions, orientation et mouvement". *HAL archives-ouvertes*, 2012.
- [92] A. Murangira. "*Nouvelles approches en filtrage particulaire. Application au recalage de la navigation inertielle*". PhD thesis, Université de Technologie de Troyes (UTT), 2014.
- [93] C. Nguyen and B. Cahour. "Véhicule électrique et gestion de son autonomie : une approche prospective ancrée dans l'expérience vécue". *Le travail humain*, 77(1) :63–89, 2014.
- [94] H. V. Nguyen. "*Estimation d'attitude et diagnostic d'une centrale d'attitude par des outils ensemblistes*". PhD thesis, Grenoble, 2011.

- [95] H. Ohnishi, J. Ishii, M. Kayano, and H. Katayama. "A Study on Road Slope Estimation for Automatic Transmission Control". *Elsevier JSAE Review*, 21(2) :235–240, 2000.
- [96] B. W. Parkinson, P. Enge, P. Axelrad, and J. J. Spilker Jr. "*Global Positioning System : Theory and Applications*", volume II. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996.
- [97] A. Patel, S. Katiyar, and V. Prasad. "Performances evaluation of different open source DEM using Differential Global Positioning System (DGPS)". *Elsevier The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 19(1) :7–16, 2016.
- [98] T. Pavlidis and S. L. Horowitz. "Segmentation of plane curves". *IEEE Transactions on Computers*, 100(8) :860–870, 1974.
- [99] M. G. Petovello. "*Real-time integration of a tactical-grade IMU and GPS for high-accuracy positioning and navigation*". Citeseer, 2003.
- [100] T. K. Peucker, R. J. Fowler, J. J. Little, and D. M. Mark. "The Triangulated Irregular Network". In *Citeseer Amer. Soc. Photogrammetry Proc. Digital Terrain Models Symposium*, volume 516, pages 532–536, 1978.
- [101] D. T. Pham. "Stochastic Methods for Sequential Data Assimilation in strongly Nonlinear Systems". *Monthly Weather Review*, 129(5) :1194–1207, 2001.
- [102] L. Qu, W. Zhuang, and N. Chen. "Instantaneous Velocity Optimization Strategy of Electric Vehicle Considering Varying Road Slopes". In *IEEE Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, pages 5483–5488, 2019.
- [103] M. Quddus and S. Washington. "Shortest path and vehicle trajectory aided map-matching for low frequency GPS data". *Elsevier Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 55 :328–339, 2015.
- [104] M. A. Quddus, R. B. Noland, and W. Y. Ochieng. "A high accuracy Fuzzy Logic based map matching algorithm for road transport". *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 10(3) :103–115, 2006.
- [105] M. A. Quddus, W. Y. Ochieng, and R. B. Noland. "Current map-matching algorithms for transport applications : State-of-the art and future research directions". *Elsevier Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 15(5) :312–328, 2007.
- [106] M. A. Quddus, W. Y. Ochieng, L. Zhao, and R. B. Noland. "A general map matching algorithm for transport telematics applications". *Springer GPS Solutions Journal*, 7(3) :157–167, 2003.
- [107] E. Raffone. "Road slope and vehicle mass estimation for light commercial vehicle using linear Kalman filter and RLS with forgetting factor integrated

- approach". In *IEEE Proceedings of the 16th International Conference on Information Fusion*, pages 1167–1172, 2013.
- [108] M. Ren and H. A. Karimi. "A Fuzzy Logic Map Matching for Wheelchair Navigation". *Springer GPS Solutions Journal*, 16(3) :273–282, 2012.
- [109] H. I. Reuter, A. Nelson, and A. Jarvis. "An evaluation of void-filling interpolation methods for SRTM data". *International Journal of Geographical Information Science*, 21(9) :983–1008, 2007.
- [110] N. Ritter, M. Ruth, B. B. Grissom, G. Galang, J. Haller, G. Stephenson, S. Covington, T. Nagy, J. Moyers, J. Stickley, et al. "GeoTIFF Format Specification GeoTIFF Revision 1.0". *SPOT Image Corp*, 2000.
- [111] S. Rougerie. "*Algorithmes de diversité d'antennes appliqués à la réception des signaux GNSS en environnement urbain et sur terminal mobile*". PhD thesis, ISAE, Toulouse, 2012.
- [112] H. Sadeq, J. Drummond, and Z. Li. "Evaluation of ASTER GDEM v.2 using GPS checkpoints, OSGB DEM values and photogrammetrically derived DEMs". *Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS)*, 4 :295–300, 2012.
- [113] G. T. Schmidt and R. E. Phillips. "INS/GPS integration architectures". Technical report, Massachusetts Inst Of Tech Lexington MA, 2010.
- [114] C. A. Scott. "Improving GPS Positioning for Motor-Vehicle Through Map Matching". In *Proceedings of ION GPS-94, Salt Lake City, Utah*, pages 1391–1394. Citeseer, 1994.
- [115] G. Selim and A. Abdel Sabour. "Extending land navigation applications to support off road based on elevation and land characteristics". In *Proceedings of IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*, pages 65–72, 2010.
- [116] R. Shankar and J. Marco. "Method for estimating the energy consumption of electric vehicles and plug-in hybrid electric vehicles under real-world driving conditions". *IET Intelligent Transport Systems*, 7(1) :138–150, 2013.
- [117] L. Shunlin, L. Xiaowen, and W. Jindi. "Chapter 2 - Geometric Processing and Positioning Techniques". In *Advanced Remote Sensing*, pages 33 – 74. Academic Press, Boston, 2012.
- [118] M. Spangenberg. "*Safe navigation for vehicles*". PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2009.
- [119] D. Srinivasan, R. L. Cheu, and C. W. Tan. "Development of an improved ERP system using GPS and AI techniques". In *IEEE Intelligent Transportation Systems Proceedings*, volume 1, pages 554–559, 2003.

- [120] P. Steigenberger and O. Montenbruck. "GALILEO status : orbits, clocks, and positioning". *Springer GPS Solutions*, pages 319–331, 2017.
- [121] S. H. Stovall. "*Basic Inertial Navigation*". Naval Air Warfare Center Weapon Division, California, USA, 1997.
- [122] E. Suwandana, K. Kawamura, Y. Sakuno, E. Kustiyanto, and B. Raharjo. "Evaluation of ASTER GDEM2 in Comparison with GDEM1, SRTM DEM and Topographic-Map-Derived DEM Using Inundation Area Analysis and RTK-dGPS Data". *Remote Sensing*, pages 2419–2431, 2012.
- [123] T. Tachikawa. "ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results". *Technical Report, NASA : Washington, DC, USA*, 2011.
- [124] T. Tachikawa, M. Hato, M. Kaku, and A. Iwasaki. "Characteristics of ASTER GDEM Version 2". *International Geoscience And Remote Sensing Symposium (IGARSS), Vancouver, Canada*, 2011.
- [125] G. Taylor, G. Blewitt, D. Steup, S. Corbett, and A. Car. "Road reduction filtering for GPS-GIS navigation". *Transactions in GIS*, 5(3) :193–207, 2001.
- [126] M. L. Tighe and D. Chamberlain. "Accuracy Comparison of the SRTM, ASTER, NED, NEXTMAP USA Digital Terrain Model over several USA Study Sites". *Technical Report Intermap Technologies : Englewood, CO, USA*, 2009.
- [127] D. H. Titterton and J. L. Weston. "Strapdown Inertial Navigation Technology". In *The Institution of Electrical Engineers*, pages 492–493, 2004.
- [128] R. Toledo-Moreo, D. Bétaille, and F. Peyret. "Lane-Level Integrity Provision for Navigation and Map Matching with GNSS, Dead Reckoning, and Enhanced Maps". *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 11(1) :100–101, 2010.
- [129] A. Ufuk Peker, O. Tosun, and T. Acarman. "Particle Filter Vehicle Localization and Map-Matching Using Map Topology". In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, pages 248–253, 2011.
- [130] J. Vaganay. "*Conception d'un système multisensoriel de localisation dynamique 3-D pour robot mobile*". PhD thesis, Université de montpellier II, 1993.
- [131] A. Van Dierendonck and C. Hegarty. "The New Civil GPS L5 Signal". *GPS World*, page 64–71, 2000.
- [132] N. R. Velaga, M. A. Quddus, and A. L. Bristow. "Developing an enhanced weight-based topological Map-Matching algorithm for intelligent transport systems". *Elsevier Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 17(6) :672–683, 2009.



- [133] O. Veneri. *"Technologies and Applications for Smart Charging of Electric and Plug-in Hybrid Vehicles"*. Springer, 2017.
- [134] J. Wang, I. Besselink, and H. Nijmeijer. "Electric vehicle energy consumption modelling and prediction based on road information". *World Electric Vehicle Journal*, 7(3) :447–458, 2015.
- [135] H. Wei, Y. Wang, G. Forman, and Y. Zhu. "Map Matching by Fréchet Distance and Global Weight Optimization". *Technical Paper, Departement of Computer Science and Engineering*, pages 19–21, 2013.
- [136] C. E. White, D. Bernstein, and A. L. Kornhauser. "Some Map Matching algorithms for personal navigation assistants". *Elsevier Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 8 :91–108, 2000.
- [137] B. Wu, S. R. Peck, and S. Wu. "Method and apparatus for Differential Global Positioning System (DGPS)-based Real Time Attitude Determination (RTAD)". *Google Patents*, 2017.
- [138] H. Yushi, X. Aigong, S. Xin, and W. Yulei. "A Modified Extended Kalman Filter for a Two-Antenna GPS/INS Vehicular Navigation System". *Sensors Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 18(11) :3809–3811, 2018.
- [139] X. Zhang, L. Xu, J. Li, and M. Ouyang. "Real-Time Estimation of Vehicle Mass and Road Grade Based on Multi-Sensor Data Fusion". In *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, pages 1–7, 2013.

## Résumé

Les travaux présentés dans cette thèse portent sur l'étude d'une méthode de fusion multi-capteurs pour l'estimation de la localisation 3-D et l'attitude d'un véhicule terrestre. Nous avons développé et validé, en situation réelle, une méthode de fusion centralisée basée sur une modélisation d'état à partir de mesures GNSS/INS provenant du capteur ublox EVK-M8U. Le système de mesure est également alimenté par des données cartographiques routières OSM et d'élévation issues des modèles numériques ASTER/World 30. Certaines mesures sont modélisées par des équations présentant de fortes non-linéarités que nous avons choisies de traiter par filtrage particulaire. La prise en compte des données cartographiques est faite de manière statistique à partir de la métrique de Mahalanobis. En outre, nous avons développé une nouvelle méthode de gestion des modèles numériques d'élévation (MNE), désignée par méthode de « Fenêtre Glissante Adjacente » (FGA) afin de limiter l'impact des artefacts présents dans ces données. Durant l'étape de gestion du MNE, nous avons mis en œuvre des approches géométriques (TIN, FGA) qui permettent de rendre plus robuste la correction d'altitude et favorise un accroissement des performances en estimation du paramètre d'inclinaison des segments de la carte routière numérique.

## Abstract

The work presented in this thesis concerns the study of a multi-sensor fusion method for the estimation of 3-D localization and the attitude of a land vehicle. We have developed and validated, in a real situation, a centralized fusion method based on state modeling from GNSS/INS measurements delivered by the ublox EVK-M8U sensor. The measurement system is also completed by OSM digital road maps and elevation data from the ASTER/World 30 digital models. Some measurements are modeled by equations with strong non-linearities which we have chosen to process by particle filtering. The cartographic data are taken into account statistically from the metric of Mahalanobis. In addition, we have developed a new method for managing digital elevation models (DEM), known as the "Fenêtre Glissante Adjacente" (FGA) method, in order to limit the impact of the artifacts that are found in this data. During the DEM management step, we implemented geometric approaches (TIN, FGA) which make the altitude correction more robust and favors an increase in performance in estimating the inclination parameter of the segments of the digital road maps.